



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds-
och växtproduktionsvetenskap

Vegetationens inverkan på det urbana klimatet

– En studie om trädens effekt på en gatukanjon i Malmö

The impact of vegetation on the urban climate

- A study of the effect of trees on a street canyon in Malmö

Linnea Saarela



Självständigt arbete • 30 hp
Hållbar stadsutveckling, ledning, organisering och förvaltning
Alnarp 2016

Vegetationens inverkan på det urbana klimatet

- En studie om trädens effekt på en gatukanjon i Malmö

The impact of vegetation on the urban climate
- A study of the effect of trees on a street canyon in Malmö

Linnea Saarela

Handledare: Ann-Mari Fransson, SLU, Institutionen för landskapsarkitektur, planering och förvaltning

Examinator: Christine Haaland, SLU, Institutionen för landskapsarkitektur, planering och förvaltning

Biträdande examinator: Frida Andreasson, SLU, Institutionen för landskapsarkitektur, planering och förvaltning

Omfattning: 30 hp

Nivå och fördjupning: A2E

Kurstitel: Självständigt arbete i hållbar stadsutveckling

Kurskod: EX0760

Ämne: Landskapsarkitektur

Program/utbildning: Hållbar stadsutveckling, ledning, organisering och förvaltning

Utgivningsort: Alnarp

Utgivningsmånad och -år: juni 2016

Omslagsbild: *Södra Förstadsgatan i Malmö* av Linnea Saarela

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: *Urbant lokalklimat, värmeö, klimatanpassning, mikroklimat, albedo, urban grönstruktur, evapotranspiration, termisk komfort*

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap

Institutionen för arbetsvetenskap, ekonomi och miljöpsykologi

Förord

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng och är det avslutande momentet på masterprogrammet *Hållbar stadsutveckling - ledning, organisering och förvaltning* vid Sveriges Lantbruksuniversitet Alnarp och Malmö högskola.

Jag har sedan tidigare en kandidatexamen som landskapsingenjör från SLU Alnarp. Landskapsingenjörsutbildningen har givit mig kunskaper inom planering, anläggning och drift av utemiljöer. Denna utbildning har lagt grunden till min förståelse för vegetationens breda användningsområde i urbana miljöer. Mitt intresse för klimatplanering väcktes under kandidatuppsatsen då jag studerade hur vegetation och permeabel mark kan fungera temperatursänkande i stadsmiljö. Det var även i detta examensarbete som jag introducerades för programvaran ENVI-met och fick förståelse för programmets möjligheter. Under hela masterprogrammet har jag haft klimatplanering i åtanke då det är en viktig aspekt att ta hänsyn till vid hållbar stadsutveckling som har en lång planeringshorisont. När det väl blev dags att skriva masteruppsatsen kändes det självklart att skriva den inom detta ämne, men att nu själv ansvara för ENVI-met simuleringarna. Vidare ville jag även utföra testerna på en verklig plats i Malmö, som har ett ogästvänligt klimat när temperaturen stiger, istället för att utföra testerna på en fiktiv plats som i kandidatuppsatsen.

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Ann-Mari Fransson vid SLU och Hans Rosenlund vid CEC Design AB för givande feedback och stöd under arbetets gång samt för era peppande ord när arbetsbördan känts extra tung. Att arbeta i en, för mig, ny programvara har både varit otroligt spännande och lärorikt som stundtals svårt och tidskrävande. Det har därför känts betryggande att ha Er att rådfråga och be om hjälp.

Linnea Saarela,
Alnarp, juni 2016

Sammanfattning

Fysisk planering i Sverige har sedan länge inneburit att anpassa våra städer för ett kallt klimat. De pågående klimatförändringarna kommer dock kräva att den fysiska planeringen även omfattas av en anpassning för ett varmt sommarhalvårsklimat, där förekomsten av extrema väderhändelser kan komma att öka. För Sverige väntar ett framtida klimat som både blir blötare och varmare med kraftigare och mer frekventa värmeböljor. Städerna kan komma att bli särskilt sårbara för höga temperaturer, då städer redan har ett varmare klimat än sin omkringliggande landsbygd. Detta fenomen kallas *värmeöeffekten* eller *Urban Heat Island*. Urban heat Island effekten innebär att städer har högre lufttemperaturer än den omkringliggande landsbygden, en skillnad som är störst kvällstid. I amerikanska miljonstäder kan detta fenomen innebära temperaturskillnader på 12°C mellan stad och landsbygd, medan det i europeiska miljonstäder har uppmätts differenser på 7-8°C.

Strategiskt planerad grönstruktur är en av de få lösningar som effektivt kan komma att klimatanpassa våra städer inför kommande utmaningar. Vegetation har förmågan att förbättra luftkvaliteten, sänka flödestoppar vid kraftig nederbörd samt skugga underliggande ytor vilket både ökar komforten för människorna som vistas i skuggan samtidigt som värmelagringen hindras i de skuggade byggnads- och gatumaterialen. På detta vis har urban grönska förmågan att verka temperatursänkande, vilket är av stort intresse för framtiden då lösningar som ökar stadens kylningsförmåga kommer efterfrågas. Kunskapen om grönskans inverkan och eventuella effekter på stadsklimatet är därmed avgörande, för att lyckas integrera den på bästa sätt.

Syftet med detta arbete är att belysa sambandet mellan en typisk urban struktur, dess specifika klimat samt hur klimatet eventuellt kan modifieras med hjälp av verktyget vegetation. Detta genom att först skapa en bred förståelse för de klimatförhållanden som är typiska i en stad, vilka faktorer som orsakar varierande klimatförhållanden samt hur vegetation kan komma att påverka sin närmiljö. Därefter kommer en egen studie i programvaran ENVI-met utföras med syfte att undersöka vad som sker med klimatet inom en gatukanjon när den har träd i sammanhängande växtbäddar respektive inte har träd eller växtbäddar. Testerna utförs ur ett framtidsperspektiv, med en beräknad höjning av medeltemperaturen på 4°C för Malmö i augusti. Testerna utförs på en utvald del av Södra Förstadsgatan, delen mellan Dalaplan och Södervärn. Klimatscenerierna som testerna utgår ifrån baseras på en vanlig framtida augustidag samt en framtida rekordvarm dag under en värmebölja med dygnsmedeltemperaturer på 21,6°C respektive 24,1°C.

Resultaten från simuleringsstudien visar att stadsträden och växtbäddarna har en stor inverkan på den termiska komforten, yttemperaturen och luftfuktigheten inom gatukanjonen samt en mindre inverkan på lufttemperaturen under kvälls- och nattid. Effekterna av trädens och växtbäddarnas närvaro är desamma mellan de två olika temperaturscenerierna, med undantag för den termiska komforten som försämras när lufttemperaturen stiger. Lufttemperaturen sänktes i fallen med träd upp till 0,51°C under kvälls- och nattid och gatumaterialets yttemperatur sänktes med 13,5°C under dagtid. Anmärkningsvärt är att växtbäddarna håller lägre yttemperatur än omgivande lufttemperatur vid samtliga tidpunkter som data plockades ut. Vid 14:00 och 16:00 har växtbäddarna 6°C lägre yttemperatur än omgivande lufttemperatur. Den termiska komforten (PPD) förbättras markant vid närvaron av stadsträd och växtbäddar. Dock var det endast vid 16:00 i scenariot för ökad medeltemperatur som komforten sänktes till accepterade nivåer.

Keywords: *Urbant lokalklimat, värmeö, klimatanpassning, mikroklimat, albedo, urban grönstruktur, evapotranspiration, termisk komfort*

Abstract

Urban planning in Sweden has had a focus on adapting cities to a cold climate for a long time. The ongoing climate change will, however, require that urban planning is also subject to an adjustment for a warm summer climate where extreme weather events may increase. The future Swedish climate is expected to be both wetter and warmer with more frequent and complicated heat waves. The cities may be especially vulnerable to high temperatures, given that cities already have a warmer climate than the surrounding countryside. This phenomenon is referred to as *The Urban Heat Island*. This phenomenon can cause up to 12°C warmer air temperatures in large American cities, and 7-8°C warmer air temperatures in large European cities, compared to their surrounding rural area.

Strategically planned green areas is one of the few solutions that can effectively adapt the urban climate to future challenges caused by climate change. Vegetation has the ability to improve air quality, reduce flood peaks during heavy rainfall and to shade underlying surfaces which increases the comfort for the people staying in the shade at the same time as potential heat storage is prevented in the underlying building and ground materials. In this way, urban greenery is able to mitigate air temperatures, which is of great interest as solutions to improve the cities cooling abilities is highly demanded for in the future. The knowledge of the impact and possible effects of green areas on the urban climate is crucial in order to successfully integrate vegetation in the compact city.

The purpose of this master thesis is to address the relationship between a typical urban structure, its specific climate and how this climate may be affected by vegetation. A study in ENVI-met is carried out in order to study the climatic effects within a street canyon when it has trees and planting beds, respectively in the absence of trees or planting beds. The tests are performed from a future perspective and are based on an estimated increase of the average air temperature with 4 °C in Malmö, Sweden, in August. The tests are performed on a selected part of Södra Förstadsgatan, between Dalaplan and Södervärn in Malmö. Two different air temperature scenarios are being tested: a future ordinary day in August, and a future hot day in August with daily average temperatures of 21.6° C respectively 24.1°C.

The results of the ENVI-met study show that urban trees and planting beds have a significant impact on the thermal comfort, the surface temperature and the humidity inside the street canyon, and also a minor impact on air temperature during evening and nighttime hours. The effects of trees and planting beds are equal between the two temperature scenarios, except for the thermal comfort that is impaired when the air temperature rises. The air temperature inside the street canyons was reduced up to 0.51°C during the evening and nighttime hours and the surface temperature of the artificial ground material was reduced up to 13.5°C during the daytime due to the presence of urban trees and planting beds. Worth mentioning is that the planting beds had lower surface temperature than the ambient air temperature at all times when data was collected (14:00 - 01:00). The planting beds had 6 °C lower surface temperature than the ambient air temperature at 14:00 and 16:00. The thermal comfort (PPD) is significantly improved by the presence of urban trees and planting beds. However, it was only in the simulation of the ordinary future August day at 16:00 that the PPD levels was reduced to acceptable levels.

Keywords: *Urban climate, Urban Heat Island, climate-conscious planning, microclimate, albedo, urban forest, evapotranspiration, thermal comfort*

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och frågeställning	3
1.3 Avgränsning	3
2. Metod	4
2.1 Litteraturstudie	4
2.2 Klimatsimulering som experiment	4
2.3 ENVI-met	5
2.4 Källkritik	6
3. Teori	8
3.1 Det urbana klimatet	8
3.1.1 Stadens strålningsbalans	10
3.1.1.1 Albedo och emissivitet	13
3.1.1.2 Luftföroreningar	15
3.1.2 Stadens vindklimat	16
3.1.2.1 Aspect ratio	16
3.1.2.2 Gatornas orientering	18
3.1.2.3 Himmelsfaktorn	19
3.1.3 Stadens luft- och markfuktighet	19
3.2 Vegetationens inverkan på stadsklimatet	20
3.2.1 Skugga	21
3.2.2 Evapotranspiration	23
3.2.3 Vegetation och vind	24
3.3 Termisk komfort	24
4. Klimatstudie i ENVI-met	26
4.1 Klimatdata Malmö	26
4.2 Gatukanjonens förutsättningar	27
5. Resultat	28
5.1 Lufttemperatur	28
5.2 Ytemperatur	29
5.2.1 Ytemperatur växtbäddar utan träd	32
5.3 Vindhastighet	33
5.4 Relativ luftfuktighet	34
5.5 Specifik luftfuktighet	36
5.6 Mean Radiant Temperature (MRT)	37
5.7 Termisk komfort	38
6. Diskussion	41
6.1 Resultatdiskussion	41
6.1.1 Lufttemperatur	41
6.1.2 Vinden	41
6.1.3 Ytemperatur	42
6.1.4 Termisk komfort	42
6.2 Egna reflektioner	43
6.3 Metodkritik	44
6.4 Vidare forskning	44
7. Slutsats	46
Referenslista	48

Figur- och tabellförteckning

Figur 1. Illustration över den urbana värmeöeffekten (Författaren, 2016)	9
Figur 2. Illustration över det urbana gränssnittet (Författaren, 2016)	10
Figur 3. Illustration över stadens strålningsbalans (Författaren, 2016)	12
Figur 4. Modell över bidragande faktorer till värmeön (Författaren, 2016)	13
Figur 5. Illustration över olika konfigurationer av aspect ratio (Författaren, 2016)	17
Figur 6. Karta över studieområdet (Google Maps, 2016)	26
Figur 7. Gatukanjonens utformning (Författaren, 2016)	27
Figur 8. Lufttemperaturen 14:00 (Författaren, 2016)	28
Figur 9. Lufttemperaturen 18:00 (Författaren, 2016)	29
Figur 10. Ytemperaturen 14:00 (Författaren, 2016)	30
Figur 11. Ytemperaturen 18:00 (Författaren, 2016)	31
Figur 12. Ytemperaturen 01:00 (Författaren, 2016)	32
Figur 13. Gatukanjonens utformning enbart växtbäddar (Författaren, 2016)	32
Figur 14. Ytemperatur växtbäddar 14:00 (Författaren, 2016)	33
Figur 15. Vindhastighet (Författaren, 2016)	34
Figur 16. Relativ luftfuktighet 16:00 (Författaren, 2016)	35
Figur 17. Relativ luftfuktighet 01:00 (Författaren, 2016)	35
Figur 18. Specifik luftfuktighet 14:00 (Författaren, 2016)	36
Figur 19. Specifik luftfuktighet 01:00 (Författaren, 2016)	37
Figur 20. Mean Radiant Temperature (MRT) 14:00 (Författaren, 2016)	38
Figur 21. Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) 14:00 (Författaren, 2016)	39
Figur 22. Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) 16:00 (Författaren, 2016)	40
Tabell 1. Wind chill factor (SMHI, 2015b)	25
Tabell 2. De situationer som kommer testas i ENVI-met (Författaren, 2016)	27

1. Inledning

1.1 Bakgrund

“Den fysiska planeringen ses som ett viktigt verktyg för att minska klimatförändringarna men också för att anpassa samhället till ett förändrat klimat” (Boverket, 2010:3).

Med dessa ord inleder f.d. divisionschef på Boverket, Martin Storm, skriften *“Mångfunktionella ytor - klimatanpassning av befintlig bebyggd miljö i städer och tätorter genom grönsstruktur”* (2010). Skriften betonar vikten av att svenska städer måste börja planeras utifrån ett klimatanpassningsperspektiv, då det svenska klimatet väntas bli allt varmare och blötare i framtiden. Vid nästa sekelskifte kan södra Sverige komma att få ett klimat som liknar det nuvarande klimatet i Frankrike eller Spanien, medan klimatet i mellersta Sverige kan komma att likna det som södra Sverige har idag (Boverket, 2009; 2010). Temperaturzonerna kommer således att förflyttas norrut. Svenska städer kräver nu, utöver en planering för ett kallt vinterklimat, även omfattas av en anpassning och planering inför ett varmt sommarhalvårsklimat där förekomsten av extrema väderhändelser kan komma att öka. Även om detta är klimatförändringar som kommer ske successivt och inte skapa några större problem förrän längre fram i tiden, är det viktigt att hantera frågor som rör städernas klimatanpassning redan idag (Westlin, 2012). Den bebyggelse och infrastruktur som planeras idag ska hålla för flera årtionden framöver och det är därmed av stor vikt att eftersträva en långsiktig planeringshorisont som beaktar de utmaningar som ett föränderligt klimat bär med sig. Utmaningar som även kan komma att påverka människans komfort och hälsa.

En ökad medeltemperatur på sommaren innebär även varmare kvällar och nätter, dessa är tillfällen när äldre eller sjuka människor vanligtvis ges möjligheten att ta igen sig efter varma dagar (Boverket, 2010). I den statliga offentliga utredningen *“Sverige inför klimatförändringarna - hot och möjligheter”* (2007) problematiseras situationen hur en alltmer åldrande generation kommer öka och den känsliga grupp som kommer bli särskilt utsatta av effekterna från en förhöjd temperatur blir större. För att förklara hur allvarligt en extrem väderhändelse kan påverka befolkningen, lyfter SOU (2007) värmeböljan som drabbade västra Europa år 2003 och där antalet värmerelaterade dödsfall kom att överstiga 33 000 den sommaren. Persson och Wern (2011) uppskattar att framtida svenska värmeböljor kan inträffa så ofta som vart tredje till vart femte år och i de värsta fallen överstiga 40°C. Utöver extrema väderhändelser likt värmeböljor finns det även forskning som visar att en förhöjning av Stockholms sommartemperatur på 4°C, kan komma att öka värmerelaterade dödsfall med 5,3 % (Frumkin & McMichael, 2008). Denna temperaturhöjning är den samma som en väntad förhöjning av medeltemperaturen för Malmö i augusti, enligt de framtida klimatscenarier som SMHI (2016b) publicerat.

I städer blir ett framtida varmare klimat särskilt påtagligt eftersom städer redan har ett varmare klimat än sin omkringsliggande landsbygd. Den höga andelen hårdgjorda material i gator och byggnader absorberar solens strålar under dagen, som sedan frigörs som värme på kvällen genom konvektion. Stadens få permeabla markytor leder dessutom bort dagvatten fort, vilket minskar andelen vatten som stannar inom staden med möjlighet till avdunstning (Bogren, Gustavsson & Loman, 1999). Dessa faktum innebär att städer har en bristfällig kyleffekt med höga temperaturer även kvälls- och nattid. Boverket (2010) betonar hur grönområden och träd i stadsmiljön kan komma att fungera riskreducerande då vegetationen med sina ekosystemtjänster kan bidra med återhämtningsfunktioner när systemen i staden belastas. Grönområden och träd kan både förbättra luftkvaliteten, minska flödestoppar vid kraftig nederbörd samt ge skugga vilket lokalt kan vara betydelsefullt för både infrastrukturen och människans komfort under perioder med extremt väder.

“Strategiskt lokaliserade i staden och integrerade med bebyggelsen och dess omland kan träd, grönområden, vattendrag och dammar fungera som luftförbättrare och temperatursänkare i staden, och samtidigt hantera ökande vattenmängder” (Boverket, 2010:7).

Exempelvis kan flödestoppar utjämnas när dagvatten avleds mot grönytor och inte enbart till brunnarna, som annars lätt kan överbelastas vid perioder med kraftig nederbörd. Grönområden och träd kan även bidra med skugga, vilket ökar komforten för människor som vistas i skuggan då de kommer undan solens värmande strålar under dagen. Vidare kan träden skugga underliggande byggnads- och gatumaterial och således minska värmelagringen i dessa, vilket i sin tur minimerar andelen värme som frigörs från materialen på kvällen till omgivande luft (Konijnendijk, Nilsson, Randrup & Schipperijn, 2005; Jansson, Persson & Östman, 2013). Vegetation har även förmågan att öka luftfuktigheten genom evapotranspirationen (avdunstning från jord och vegetation) vilket kan ha en positiv effekt för komforten under dagar med höga temperaturer (Shashua-Bar & Hoffman, 2000; Dimoudi & Nikolopoulou, 2003). Då vegetation kan bidra med många positiva aspekter som går i linje med de insatser som krävs för städers klimatanpassning, menar Boverket (2010) att det är av stor vikt att grönskans roll börjar räknas in i städers strategiska investeringar. Även Westlin (2012) menar att den tekniska infrastrukturen och grönstrukturen behöver planeras strategiskt för att lyckas möta de utmaningar som ett förändrat klimat bär med sig, framförallt i befintlig bebyggelse.

Strategisk planering av vegetation i städer har inte enbart betydelse för framtiden och de utmaningar svenska städer står inför, även idag finns det platser i staden som hade kunnat få ett behagligare klimat under sommarhalvåret genom strategiskt placerad vegetation. Det finns därmed flera goda anledningar att redan idag börja prioritera klimataspekten och att även beakta ett sommarklimatperspektiv vid fysisk planering. Eftersom den urbana strukturen och formen generellt varierar från plats till plats, kommer varierande klimat i mikroskala uppstå beroende på platsens specifika utformning och innehåll. Således kan två platser som ligger nära varandra på kartan få vitt skilda klimat beroende på hur den direkta omgivningen ser ut och detta påverkar hur exempelvis strålning och vind utvecklas (Thorsson, 2012). Genom att förstå de bakomliggande faktorerna som bidrar till stadens typiska klimatförhållanden, hur den urbana strukturen påverkar sitt närklimat samt hur meteorologiska parametrar påverkas kring olika bebyggelsestrukturer, kan dessa platser modifieras med kontextanpassade lösningar utifrån platsens specifika problembild.

Bakgrunden till detta examensarbete är behovet av att finna lösningar som har möjlighet att effektivt sänka de höga temperaturer som kan uppstå lokalt i städer, både idag och i framtiden när varmare dagar och fler frekventa värmeböljor väntas. Detta kommer studeras med särskilt fokus på vegetationens inverkan på sitt närklimat. Förståelsen för vilka faktorer som bidrar till extrema klimat samt hur klimatet kan modifieras genom strategisk planerad vegetation, kan i förlängningen leda till att städers lokalklimat förbättras och att människans komfort ökar i stadsrummet. För grönyteplanerare är det av stor vikt att känna till vegetationens multifunktionalitet och hur den kan användas i flera syften i stadsmiljön. Först då kan grönytor planeras och placeras strategiskt, för att på detta sätt utnyttja dess fulla kapacitet under både kalla och varma perioder.

1.2 Syfte och frågeställning

Syftet med detta arbete är att belysa sambandet mellan en typisk urban struktur, dess specifika klimat samt hur det eventuellt kan modifieras med hjälp av verktyget vegetation. Detta genom att först undersöka det urbana klimatet och de faktorer som är starkt bidragande till det varierande och extrema klimat som uppstår här, särskilt under perioder med höga temperaturer. För att sedan studera hur vegetation kan bidra till ett behagligt klimat när temperaturen stiger, genom att belysa hur vegetation kan verka temperatursänkande. Denna kunskap ska sedan appliceras på en egen simuleringsstudie i programvaran ENVI-met, som ett konkret sätt att studera och mäta de eventuella skillnaderna som kan uppstå i en gatukanjon i Malmö när den har vegetation respektive inte har vegetation. Arbetet ämnar svara på följande frågeställningar:

- *Vilka effekter har stadsträd och sammanhängande växtbäddar på klimatet på en utvald del av Södra Förstadsgatan i Malmö under en framtida sommardag?*
- *Vilka effekter har stadsträd och sammanhängande växtbäddar på klimatet på en utvald del av Södra Förstadsgatan i Malmö under en framtida värmebölja?*

1.3 Avgränsning

En tydlig avgränsning är arbetets sommarperspektiv då det främst är effekten av höga temperaturer i stadsmiljö som kommer studeras, när utemiljön är ogästvänlig på grund av värmen. Således kommer inte arbetet behandla urban planering ur ett vinterperspektiv, hur behagliga mikroklimat kan skapas när temperaturerna är låga och när utemiljön är ogästvänlig på grund av kyla. Vidare är det främst vegetationen som verktyg och dess förmåga att påverka klimatet i dess närmiljö som kommer belysas. Andra lösningar som finns för att höja komforten på olika platser i staden, såsom pergolor eller andra typer av sol- eller vindskydd, kommer inte behandlas i detta arbete. Heller kommer inte andra ekosystemtjänster som vegetativa ytor bidrar med belysas ytterligare, även om dessa oundvikligen också existerar där det finns grönska.

Den egna studien kommer vara geografiskt avgränsad till Malmö och baseras på en utvald gatukanjons specifika utformning samt Malmös specifika väderdata. Genom att använda en konkret plats kommer studien kunna påvisa generella fenomen och effekter som fysiska planerare kan dra lärdom av vid planeringen av andra platser. Ytterligare avgränsningar för den egna studien är att den har ett framtidsperspektiv och således inte utgår ifrån dagens dygnsmedeltemperaturer på sommaren. Ett framtida sommarklimat har beräknats utifrån ett framtida klimatscenarie som publicerats av SMHI som visar en ökad dygnsmedeltemperatur på 4°C för Malmö i framtiden (SMHI, 2016b).

2. Metod

Undersökningsmetoder som använts för att kunna besvara frågeställningarna är dels en litteraturstudie och dels en klimatsimulering som utförs i programvaran ENVI-met. Arbetet kommer därmed bestå av två delar. Den första delen som utgörs av litteraturstudien har som avsikt att skapa en bred förståelse för stadens lokalklimat och vilka faktorer som bidrar till stadens komplexa och varierande klimat. Framförallt kommer faktorer som strålning, vind och fukt att belysas med koppling till hur den naturliga värme- och fuktbalansen rubbas av stadens specifika utformning och höga andel byggnads- och gatumaterial. Vidare ämnar litteraturstudien belysa vegetationens egenskaper och möjlighet att påverka stadsklimatet och därmed komforten i dess närmiljö. Syftet med litteraturstudien är dels att undersöka forskningsfältet i sig för att kunna skapa en omfattande översikt, men även för att finna underlag och kunskap till klimatsimuleringen för att i ett senare skede kunna placera den i ett större perspektiv.

2.1 Litteraturstudie

Litteraturstudien baseras dels på äldre tryckt litteratur men även på aktuella vetenskapliga artiklar med forskningsresultat från hela världen som studerat det urbana klimatet, vilka faktorer som påverkar detta samt potentiella lösningar för att öka komforten och minimera den urbana värmeön. Detta är tryckt litteratur och vetenskapliga artiklar inom fält som meteorologi, byggnadsteknik, biologi, ekologi och landskapsarkitektur. Sökmotorer som använts för att finna relevant litteratur är Malmö högskolas söktjänst *Summon*, Sveriges lantbruksuniversitets söktjänst *Primo* samt *Google Scholar*. Majoriteten av de vetenskapliga artiklarna har laddats ner från plattformen *Scencedirect*. Sökorden som använts är olika ordkombinationer på både svenska och engelska inom ämnena *lokalklimat*, *värmeöeffekten*, *klimatanpassning*, *albedo*, *evapotranspiration* och *urban grönstruktur*. Hänsyn har tagits till artiklarnas legitimitet, ifall de är *peer reviewed* eller ofta refererade till i andra artiklar inom respektive fält. Då relevanta artiklar hittats har vidare urval gjorts utifrån intressanta referenser som dessa artiklar valt att använda. Den tryckta litteraturen kan tyckas åldrad, med exempelvis Geiger (1965) eller Oke (1987). Det ska nämnas att mycket av grunden inom klimatforskning lades då, framförallt på 80-talet, och aktuella vetenskapliga artiklar som behandlar klimatfrågor hänvisar fortfarande flitigt till dessa källor.

2.2 Klimatsimulering

Den andra delen av uppsatsen består av en klimatsimulering som utförs i programvaran ENVI-met *V4.0 Beta I*. Genom olika simuleringar kommer en verklig urban plats studeras, för att analysera vad som händer med klimatet när platsen har vegetation respektive inte har vegetation. Detta för att på ett konkret sätt kunna testa och diskutera vilka eventuella effekter vegetation har på klimatet och komforten under en varm sommardag. Klimatsimuleringen blir således ett sätt att omsätta teorin ifrån litteraturstudien i praktiken. Platsen som testerna kommer utföras på är Södra Förstadsgatan i Malmö, delen mellan Dalaplan och Södervärn. Specifikt fokusområde är gatukanjonen mellan Fritz Bauersgatan och Flensburggatan. Valet av plats är en rekommendation från Annika Kruise på Miljöförvaltningen i Malmö och föreslogs då platsen har ett ogästvänligt klimat vid höga temperaturer. Testerna kommer att utföras ur ett framtidsperspektiv och baseras på en förväntad ökning av dygnsmedeltemperaturen med 4°C i Malmö. Den allmänna temperaturökningen baseras på ett framtida klimatscenario som SMHI publicerat (SMHI, 2016b). Förutom att tester kommer utföras på en normal framtida augustidag kommer ytterligare tester utföras på en framtida rekordvarm dag för att studera hur gatuklimatet utvecklas under en värmebölja. Gatukanjonen med träd, respektive utan träd kommer testas utifrån båda temperaturscenerierna. Sammanlagt kommer fyra olika scenarier att testas.

De klimatdata som testerna baseras på är hämtade från plattformarna METEONORM och EnergyPlus. METEONORM samlar in och sammanställer meteorologiska parametrar såsom temperatur, strålningsdata, vindriktning, vindhastighet etc. från hela världen (METEONORM, 2016). Från EnergyPlus går det att ladda ned officiella väderdata från olika mätstationer runtom i världen samt IWECDATA (*International Weather for Energy Calculation*) (EnergyPlus, 2016). Både METEONORM och IWECDATA används flitigt av klimatforskare och kan därför anses legitima att använda. Från METEONORM kommer data över Malmös dygnsmedeltemperatur, luftfuktighet, vindhastighet och vindriktning att hämtas. Malmös hittills varmaste dygnsmedeltemperatur i augusti kommer att baseras på IWECDATA från EnergyPlus. Genom att utgå ifrån uppmätta värden på dagens dygnsmedeltemperatur för augusti (METEONORM) samt uppmätta värden på en rekordvarm vecka i augusti (IWECDATA), kommer 4°C adderas för att skapa två olika framtidsscenario. Dygnsmedeltemperaturen för en framtida vanlig augustidag blir då 21,6°C respektive 24,1°C för en framtida rekordvarm dag. Testerna kommer utföras den 06/08/2100, d.v.s. 74 år framåt i tiden.

Programvaran ENVI-met har vissa begränsningar som bör lyftas fram. Johansson (2006b) menar att programvaran är förhållandevis lätt att använda men poängterar svårigheterna kring att programmet kräver förkunskaper inom klimatologi för att kunna användas på rätt sätt. Av den anledningen är analyserna i detta arbete övergripande och kommer främst belysa effekterna som sker inom gatukänslan i stora drag. Programvaran ENVI-met är under ständig utveckling för att påträffade buggar samt beräkningar av olika faktorer och dess interaktion med varandra ska kunna korrigeras och förbättras. Så sent som den 22/04/16 släpptes en ny version av ENVI-met, V.4 BETA II. Vid denna tidpunkt hade testerna för detta arbete redan simulerats och analyserats. Dock visade sig en faktor, Mean Radiant Temperature (MRT), vara anmärkningsvärt hög vid samtliga tester. Det är stor risk att denna faktor kan ha påverkat andra faktorer såsom lufttemperatur och termisk komfort. Av den anledningen gjordes samtliga tester om i den nya versionen för att se om nivåerna av MRT kunde balanseras. Resultaten från dessa körningar visade att faktorer som lufttemperatur och MRT fick högre värden i den nya versionen och att MRT fick samma skillnad i förhållande till lufttemperaturen som faktorn hade i den tidigare versionen. Därmed togs beslutet att använda de tidigare resultaten eftersom skillnaderna mellan fallen som testades fortfarande stämde överens i den nya versionen, det var endast nivåerna som skiljde sig åt.

2.3 ENVI-met

ENVI-met är en holistisk tredimensionell modell med möjlighet att simulera mikroklimatet på en specifik plats genom att mäta interaktionen mellan byggnaderna, atmosfären, marken och vegetationen (Ambrosini, Galli, Manchini, Nardi & Sfarra, 2014; Yang, Zhao, Bruse & Meng, 2013). Modellen arbetar med två olika system, mark och atmosfär (Carfan, Galvani & Nery, 2011). Dessa system går att kontextanpassa genom att ange studieområdets geografiska placering, specifika väderdata, mark- och byggnadsmaterial samt jordtyp och vegetationstyp. Modellen tar sedan hänsyn till de meteorologiska variationer som uppstår under ett dygn.

För att modellen ska kunna avgöra hur atmosfäriska processer utvecklas under dygnet beräknas parametrar som vindriktning- och hastighet, tredimensionell turbulens, lufttemperatur och relativ luftfuktighet. Modellen tar då hänsyn till hur dessa parametrar reagerar runt element som byggnader och vegetation. För att kunna beräkna hur olika ytor påverkar sin omgivning, tar modellen hänsyn till ytornas specifika albedo för att kunna beräkna andelen emitterad långvågig strålning samt reflekterad kortvågig strålning (Ambrosini et al., 2014). De hårdgjorda ytorna,

såsom asfalt eller betong, behandlas som slutna material och från dessa beräknas den värmeöverföring som sker från materialet till omgivningen (Yang et al., 2013).

För att beräkna de processer som sker vid naturliga ytor, såsom bar jord, tar modellen hänsyn till de termodynamiska- och hydrodynamiska processer som sker i och vid jorden, d.v.s. den transport av värme och avdunstning som sker från marken till omgivningen (Ambrosini et al., 2014). Markens system är uppdelat i 14 lager, där ytlagren är grunda för att bli tjockare djupare ner (Yang et al., 2013). Modellen betraktar därmed ingen jordyta som homogen. Vidare beräknar även modellen de processer som sker kring olika typer av vegetation och hänsyn tas då till faktorer som *Leaf Area Density* (LAD) och *Root Area Density* (RAD). Detta är värden som beskriver bladens vertikala fördelning i trädkronan (Eschenbach & Kappen, 1996; Carfan, Galvani & Nery, 2011) samt rötternas totala djup i jorden (Shinzato & Duarte, 2012). För vegetationen beräknas bladens temperatur samt det värmeutbyte som sker mellan bladet och dess omgivning, vilket dels påverkar stomata och reglerar transpirationshastigheten. Vidare hänsyn tas även till hur vindflödet påverkas kring vegetationen och då tar modellen även hänsyn till trädens form (Ambrosini et al., 2014).

Exempelvis kan ENVI-met användas för att testa olika modifikationer på en specifik plats, för att kunna jämföra och avgöra vilken av dessa modifikationer som är mest lämplig för platsen ifråga utifrån ett komfort- och mikroklimatperspektiv. På samma sätt kan olika gestaltungs-förslag testas innan ett nytt område bebyggs för att se hur mikroklimatet påverkas av de olika förslagen utifrån olika aspekter. Den fysiska modell som byggs upp av användaren kan både utgå ifrån en verklig eller en fiktiv plats, beroende på testernas syfte.

2.4 Källkritik

Det råder alltid viss osäkerhet med studier som utförs på framtida scenarier, då ingen forskare med säkerhet kan veta hur framtidens klimat kommer bli. Således är det av vikt att betona att dessa klimatsimuleringar baseras på *ett av många* klimatscenarier som gjorts för framtiden. Exempelvis kan framtida värmeböljor komma att bli betydligt allvarligare än de data som denna studie baseras på. Vidare är det av vikt att belysa att uppgifter gällande Malmös dygnsmedeltemperatur i augusti skiljer sig mellan olika källor. Exempelvis visar METEONORM, som denna studie delvis utgår ifrån, lägre dygnsmedeltemperatur i augusti än de data som SMHI publicerar (SMHI, 2016b). Dock har valet av väderdata för denna studie gjorts för dess tillförlitlighet, baserat på det faktum att många forskare inom fältet använder sig av data från METEONORM samt EnergyPlus IWECC-data.

Vidare källkritik kan riktas åt de forskningsresultat som lyfts i litteraturstudien, då de kommer från olika typer av studier utförda med varierade metoder. Några av studierna är utförda i fält medan andra utförts i modell vilket kan ge olika resultat då modeller sällan kan jämföras med verkligheten (Yang et al., 2013). Resultatet i en studie kan påverkas av hur och var mätningarna utförts eller vilken tid på dygnet data samlats in, vid vilka tidsintervaller. Skillnader i ingångsvärden kan skapa varierade resultat trots att studierna är utförda efter liknande metoder. Studier som utförts på städer kan komma att bli särskilt svåra att jämföra eftersom städer som känt har ett väldigt komplext klimat som avgörs av flera omgivande faktorer för platsen ifråga. Resultaten kan därmed vara väldigt kontextspecifika och påverkas av platsens karaktäristiska utformning. Detta gör att det finns risk att studier som är utförda i andra länder eller städer inte alltid är applicerbara på det svenska klimatet eller staden ifråga och de bör således tolkas med viss försiktighet.

Likaså kan skillnader uppstå resultaten emellan beroende på om studierna ifråga mätt eller studerat det specifika fenomenet på liknande sätt. I de fall där studierna inte har gjort det, är chansen stor att resultaten anmärkningsvärt kommer skilja sig åt. Exempel på denna problematik lyfter Eliasson (1996) när hon visar att flera studier använder faktorerna yt- och lufttemperatur synonymt när de jämför resultat eller rapporter, vilket ger missvisande resultat då dessa i regel skiljer sig åt väsentligt. Yttemperaturen varierar kraftigt beroende på tidpunkt under dagen, tillskillnad från lufttemperaturen som är mer stabil (Wong et al., 2008). Detaljer likt dessa försvårar jämförbarheten studierna emellan, vilket ur en källkritisk synvinkel är högst relevant vid genomförandet av ett arbete likt detta. Trots nämnda farhågor gällande felmarginaler och brist i jämförbarhet kan forskningsresultaten, trots att de är utförda med varierade metoder och tillvägagångssätt, ändå ge en fingervisning om de stora dragen och vilka effekter som kan uppstå. Det finns därmed flera goda anledningar att belysa annan forskning inom valt fält för att skapa en övergripande bild av olika relevanta aspekter för studien ifråga.

Av ovan nämnda anledningar kommer forskningsresultat som lyfts i litteraturstudien främst belysas för att stärka ett påstående eller för att konkret kunna exemplifiera eventuella effekter i stora drag. I diskussionskapitlet kommer vissa forskningsresultat att jämföras med koppling till de resultat som framgår av den egna studien, för att se om resultaten går i linje med eller motsäger varandra. I dessa fall kommer särskild hänsyn tas till tidigare nämnda faktorer för att undgå att jämföra resultaten rakt av och dra för konkreta slutsatser, då det kan leda till ytterligare missvisande resultat.

3. Teori

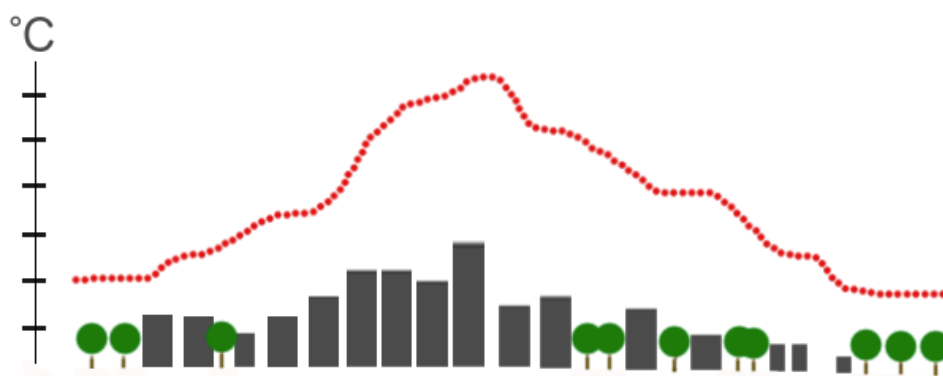
Kapitlet är indelat i två delar. I den första delen kommer det urbana lokalklimatet att studeras genom att belysa de faktorer som är starkt bidragande till stadens karaktäristiska och varierande klimat. Här kommer en del begrepp att introduceras för att bidra till förståelsen kring varför det urbana klimatet skiljer sig så väsentligt från den omkringliggande landsbygden, varför meteorologiska parametrar ter sig annorlunda här samt varför det urbana klimatet kan variera från plats till plats. Denna genomgång är ett sätt att visa hur stadens lokalisering, utformning och innehåll påverkar platsens specifika klimat. Kapitlets andra del handlar om hur urban vegetation påverkar sin omgivning och hur den kan användas som verktyg för klimatanpassning, för att modifiera höga temperaturer och höja komforten i utemiljön. Särskilt fokus kommer ligga på strålning, vind och fukt samt vegetationens förmåga att skapa skugga, evapotranspiration och modifiera vinden.

3.1 Det urbana lokalklimatet

Det specifika urbana lokalklimatet beror framförallt på vilken klimatzon staden ifråga ligger i. Faktorer som avgör klimatet är de regionala väderförhållandena, närheten till vatten, höjden över havet samt topografin. Varje stads klimat blir således unikt beroende på globala, regionala och lokala förutsättningar. Trots detta finns det vissa faktorer och fysiska parametrar som de flesta städer har gemensamt och som bidrar till att städer världen över får ett lokalklimat som ofta skiljer sig från den omkringliggande landsbygden (Watkins, Palmer & Kolokotroni, 2007). Dessa faktorer är framförallt städernas höga byggnader och hårdgjorda ytor med varierande yt- och materialegenskaper som modifierar de marknära förhållandena avseende strålning, temperatur, fukt och vind (Thorsson, 2012). När gatu- och byggnadsmaterial ersätter vegetativa ytor, som landskapet ursprungligen består av, rubbas den naturliga fukt- och värmebalansen (Oke, 1987; Geiger, 1965).

Den naturliga fuktbalansen rubbas eftersom stadens hårdgjorda gatumaterial snabbt avleder dagvatten till brunnarna och således förhindrar fukt att infiltrera ner i marken (Oke, 1987; Geiger, 1965). Vidare rubbas den naturliga värmebalansen då stadens byggnads- och gatumaterial absorberar och lagrar värme från solens strålar, i högre utsträckning än vegetativa ytor. Värmen som materialen lagrar under dagen, avges sedan som värme till omgivande luft på kvällen genom processen konvektion. Resultatet av detta blir att staden generellt har en lägre markfuktighet och högre medeltemperatur både dag- och nattid, än dess omkringliggande landsbygd. De lokala temperaturskillnaderna mellan stad och landsbygd är ett fenomen som kommit att kallas *värmeöeffekten* eller *Urban Heat Island* (UHI) som är den engelska termen (Bogren, Gustavsson & Loman, 1999).

Temperaturskillnaden är som störst på natten, särskilt när det är klart och vindstilla (Svensson & Eliasson, 1999). I amerikanska miljonstäder kan temperaturskillnader på 12°C uppstå mellan stad och landsbygd, medan det i europeiska miljonstäder har uppmätts differenser på 7-8°C (Bogren, Gustavsson & Loman, 1999). Att storleken på värmeön varierar från stad till stad trots att invånarantalet är detsamma, kan bero på flera olika faktorer. Städer ser olika ut avseende byggnadernas geometri, täthet och höjd samt avseende vilka material- och ytegenskaper som stadens specifika byggnads- och gatumaterial besitter. Vidare menar Thorsson (2012) att andelen luftföroreningar och utsläpp av spillvärme från byggnader, bilar och industrier även bidrar till värmeöns storlek och detta kan variera från stad till stad. Se figur 1 för en illustration som visualiserar värmeöeffekten över en urban miljö.

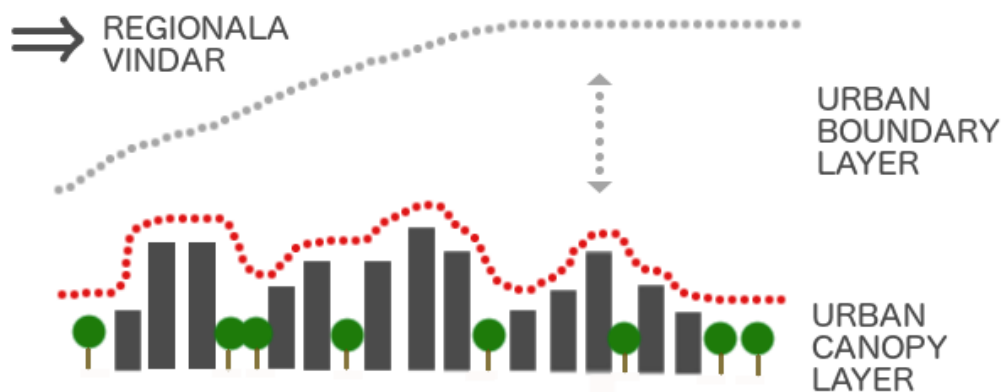


Figur 1. Värmeöeffekten över en urban miljö. Den röda prickade markeringen visualiserar hur temperaturen stiger i förhållande till den urbana tätheten. Illustration: Författaren (2016).

Wong et al. (2008) menar att det finns två olika typer av urbana värmeöar, den som rör ytttemperaturen och den som rör lufttemperaturen. De olika typerna skiljer sig åt med avseende på sättet de uppstår på samt deras inverkan på det urbana klimatet. Värmeön som rör ytttemperaturen är som mest påtaglig på dagen och särskilt på sommaren när byggnads- och gatumaterialen absorberar strålning. Även om värmeön som rör ytttemperaturen är som störst dagtid, är den även närvarande kvällstid. Värmeön som rör lufttemperaturen skiljer sig här, då den intensifieras främst under kvällstid när materialen avger värme till omgivande luft genom konvektion. Ytttemperaturen har alltså en indirekt men signifikant påverkan på lufttemperaturen och detta särskilt i det lägre urbana gränsskiktet. Dock poängterar Wong et al. (2008) att förhållandet mellan yt- och lufttemperatur inte är konstant. Yttemperaturer varierar vanligtvis mycket mer än lufttemperaturen gör då lufttemperaturen är relativt stabil under dagen. Värmeön som är kopplad till lufttemperatur studeras ofta utifrån de olika luftlager som finns i och kring staden. Oke (1987) preciserar dessa luftlager som antingen under eller ovan taken på stadens byggnader och kallar dem *Urban Canopy Layer* och *Urban Boundary Layer*.

Urban Canopy Layer beskrivs som atmosfären mellan marken och byggnadernas tak. Här påverkas luft- och energiflödena av de egenskaper och processer som sker på den specifika platsen ifråga beroende på hur ytan är utformad, vilka objekt som finns här och hur de interagerar med varandra. Av denna anledning kan väldigt lokala klimat i mikroskala uppstå här. Vidare beskrivs atmosfären ovan taken som Urban Boundary Layer och här påverkas luft- och energiflödena av både stadens och de regionala processerna (Oke, 1987). Se figur 2 för en illustration över dessa luftlager och var gränserna mellan dem går.

Thorsson (2012) beskriver samma uppdelning men väljer att benämna atmosfären kring staden för det *urbana gränsskiktet* och beskriver istället en lägre- och högre del av detta luftskikt. Författaren (2012) påpekar att det sker stora rumsliga variationer i temperatur, vindriktning och vindhastighet i den lägre delen av det urbana gränsskiktet på grund av de faktorer som tidigare lyftes av Oke (1987). Vidare betonar författaren att den vertikala utsträckningen av det urbana gränsskiktet varierar över dygnet men att den är som störst på dagen, då den kan överskrida ett par tusen meter. På kvälls- och nattid är den väsentligt lägre eftersom luften normalt sett stabiliseras då. En studie som går i linje med detta påstående utfördes av Simpson, Raman, Lundquist och Leach (2007), som på en solig sommardag i Oklahoma City kunde uppmäta det urbana gränsskiktet till 3000 meter under eftermiddagen. Författarna (ibid.) poängterar att resultatet beror på den starka konvektion som uppstår i staden under sommarhalvåret.



Figur 2. Det urbana gränsskiktet innehållande de luftlager som vanligtvis studeras med koppling till värmeön.
Illustration: Författaren (2016) med inspiration från Oke (1987).

Skillnaden mellan lokal- och mikroklimat är att lokalklimatet kännetecknas av de regionala variationerna för en större yta som exempelvis en stad, medan mikroklimat avser mindre områden som exempelvis en trädgård, en gata eller en busshållskur (Brown & Gillespie, 1995). Lokalklimatet avser alltså hela staden och mikroklimatet avser de väldigt lokala klimat som uppstår inom staden ifråga och som påverkas av sin direkta omgivnings innehåll.

Byggnadernas variation i geometri, täthet och höjd tillsammans med byggnadernas och markens materialegenskaper bidrar till uppkomsten av platsspecifika mikroklimat i staden. Thorsson (2012) menar att energiutbytet och balansen mellan luft och mark avgör platsens klimat och att mängden inkommande energi från solens strålar, markens egenskaper och atmosfärens förmåga att transportera värme avgör hur detta energiutbyte sker. Vidare beskriver Oke (1987) hur mikroklimat i staden påverkas av vinkeln på solinstrålningen, vindhastigheten, vindriktningen och vattenhalten i marken och luften. Därmed kan de mikroklimat som uppstår i staden skilja sig åt markant, trots att de ligger nära varandra, beroende på hur den direkta omgivningen ser ut.

Glaumann och Nord (1993) betonar att det är svårt att medvetet påverka stadens lokalklimat, att detta främst kan uppnås genom större insatser som exempelvis en större stadsutbyggnad. Desto lättare är det att påverka den lilla skalan, d.v.s. mikroklimatet. Vidare lyfter författarna (ibid.) att närklimatet kan förändras genom mark- och byggnadsplaneringen beroende på valda hushöjder, gatans orientering, marklutningar och andel vegetation. Samtliga komponenter är klimatpåverkande i den lilla skalan och kunskap om hur varje komponent har förmåga att påverka sin direkta närmiljö, kan möjliggöra strategisk planering utifrån ett klimatperspektiv.

3.1.1 Stadens strålningsbalans

Det finns olika typer av strålning som tar sig in och ut ur stadslandskapet och som påverkar dess klimat. Först och främst går det att konstatera att alla kroppar som har en temperatur över den absoluta nollpunkten kommer att utsända strålning (SMHI, 2016c). Den strålning som har mest betydande effekt på stadsklimatet är dock den strålning som solen emitterar, utsänder, till jorden i form av elektromagnetiska vågrörelser som uppfattas som värme och ljus. Strålningen från solen kan delas upp som ultraviolett strålning, infraröd energi och synligt ljus (Brown & Gillespie, 1995). Magnusson (2009) menar att strålningsenergin från solen är oförstörbar men poängterar att den kan omvandlas i olika former och således spridas på olika sätt. Energin kan antingen omvandlas till värme eller kemiskt bunden energi. SMHI (2015a) lyfter att moln är den främsta

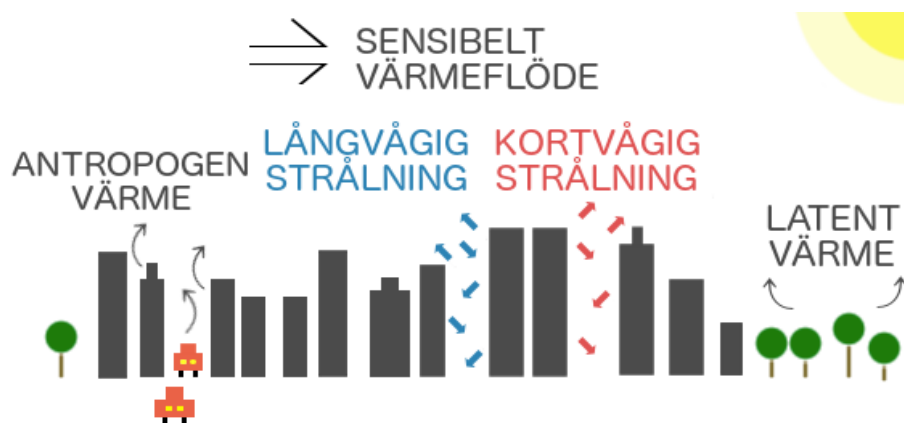
meteorologiska faktorn som påverkar både den inkommande och utgående kort- och långvågiga strålningen. Oke (1987) delar av denna anledning upp inkommande strålning som *direkt* eller *diffus*. Direkt strålning är den strålning som når jorden utan att absorberas eller reflekteras i atmosfären. Det är den direkta strålningen som främst värmer upp materialen på jordens markyta. Diffus strålning är när strålningen som emitteras från solen försvagas längs vägen av partiklar och vattenånga som finns i atmosfären. Moln är goda spridare av diffus strålning eftersom de reflekterar och absorberar mycket av strålningen som emitteras från solen (Oke, 1987).

Strålningen som solen emitterar till jorden är kortvågig (SMHI, 2016c). Thorsson (2012) förklarar att andelen *inkommande kortvågig strålning* som når jordskorpan beror på solhöjden, solvinkeln och molnmängden ovan platsen ifråga. Hur mycket av den kortvågiga strålningen som sedan kommer nå marken inom staden beror på byggnadernas geometri, höjd och täthet. Dessa faktorer kommer ha en betydande effekt för hur mycket solstrålning som når underliggande ytor (Thorsson, 2012). Den *inkommande långvågiga strålningen* (benämns även som *värmestrålning*) är den som utstrålas från moln, gaser och partiklar i atmosfären ner till jorden (Magnusson, 2009). Molnens temperatur spelar en betydande roll gällande hur stor andel långvågig strålning som utstrålas. Ju högre temperatur som molnen har, desto mer långvågig strålning släpper de ut. Det innebär att moln som ligger lågt kommer sända ut mer långvågig strålning än de som ligger högt, eftersom dessa oftast blir varmare än de moln som ligger högt upp i atmosfären (SMHI, 2015a).

Det går även att tala om den strålning som sänds tillbaka ut i atmosfären från staden, d.v.s. den *utgående kortvågiga- och långvågiga strålningen*. Thorsson (2012) menar att den utgående kortvågiga strålningen är den som omedelbart reflekteras och sänds tillbaka till atmosfären igen. Vidare beskriver Magnusson (2009) den utgående långvågiga strålningen som den värmestrålning som skickas tillbaka ut i atmosfären igen från material, mark eller vegetation. Här är materialets eller elementets albedo (reflektionsförmåga) och emissivitet (förmåga att avge värme) avgörande avseende hur mycket energi som reflekteras direkt eller istället absorberas för att i ett senare skede emitteras som långvågig strålning. Hur objektet tar emot och sänder tillbaka strålning i atmosfären beror således till stor del på materialets albedo och yttemperatur (Landsberg, 1981). Sammantaget beskrivs inkommande och utgående kortvågig- och långvågig strålning med begreppet *nettostrålning* (Oke, 1987). Nettostrålningen är generellt sett högre i staden än dess omkringliggande landsbygd på grund av den höga andelen byggnads- och gatumaterial som lagrar värme (Thorsson, 2012).

Energibalansen i staden präglas av att den kortvågiga strålningen absorberas av stadens olika material, samtidigt som de höga byggnaderna försvårar för den långvågiga strålningen att sändas tillbaka ut till atmosfären igen (Wong et al., 2008). Även Konijnendijk et al. (2005) problematiserar det faktum att risken är stor att den långvågiga strålningen kommer studsa mellan byggnadernas material och absorberas istället för att skickas tillbaka ut i atmosfären. Oke (1987) pekar på stadens större molnbildningar som i kombination med höga byggnader minskar de atmosfäriska fönstren som annars tillåter den långvågiga strålningen att återsändas till atmosfären. Denna problematik går även att härleda till begreppet *himmelsfaktorn* som på engelska är känt som *sky view factor*. Thorsson (2012) kopplar ihop detta begrepp som ett mått för att avgöra bebyggelsetätheten på platsen ifråga. Genom detta mått går det att avgöra hur stor del av himmeln som är exponerad från en specifik punkt i landskapet. Hur stor andel av himmeln som syns, har således en stor betydelse för både den inkommande och utgående strålningen (se även rubriken *himmelsfaktorn*).

Det finns även andra värmeflöden som påverkar stadens klimat och ett av dessa är det *antropogena värmeflödet*, d.v.s. den energi som släpps ut i atmosfären på grund av mänsklig aktivitet (Taha, 1997). Lindberg et al. (2013) lyfter städernas stora belysnings-, kylnings- och uppvärmningsbehov som bidragande faktorer till varför detta flöde är särskilt stort i staden. I varma klimat kan det på sommaren bildas en ond spiral när luftkonditioneringen släpper ut värme för att kunna kyla ned inomhusklimatet, vilket ökar stadens redan höga temperaturer. Även biltrafik och transport samt människans metabolism i sig är bidragande faktorer till det antropogena värmeflödets intensitet. Vidare poängterar författarna (ibid.) att detta värmeflöde varierar från stad till stad och från område till område inom staden ifråga, detta beroende på vilka aktiviteter som sker i området och hur stadens elkonsumention ser ut. Se figur 3 för en illustration av stadens strålningsbalans.



Figur 3. Stadens strålningsbalans med naturliga och antropogena källor till den värme som ackumuleras och bidrar till värmeöffekten. Illustration: Författaren (2016) med inspiration från Wong et al. (2008).

Processen när ett objekt absorberar och lagrar värme kallas *konduktion*. Processen när värmen sedan avges till omgivande luft kallas *konvektion* (Brown & Gillespie, 1995). Sammantaget kallas det energiutbyte som sker mellan konduktion och konvektion för ett *sensibelt värmeflöde*. SMHI (2014) beskriver detta flöde genom att förklara hur luft värms vid markytan för att sedan stiga uppåt. På grund av att det finns så många material i staden som absorberar energi, utgör det sensibla värmeflödet en stor del av stadens totala energibalans. Grimmond och Oke (1995) har uppskattat att det sensibla värmeflödet utgör ca. 40 % av stadens totala energibalans per dygn. Det omkringliggande landskapets energibalans skiljer sig dock ifrån stadens, där istället det *latenta värmeflödet* utgör den största delen av energibalansen.

Det latenta värmeflödet beskrivs av Thorsson (2012:10) som "den värme som ett ämne absorberar eller avger då det ändrar fas (t ex. från fast till flytande eller till gas)". SMHI (2014) förklarar att denna avdunstning kallas för ett värmeflöde eftersom värme går åt vid markytan för att bilda vattenånga, samt för att värme frigörs i atmosfären då vattenångan kondenserar vid bildandet av moln och vattendroppar. Vidare menar Thorsson (2012) att närvaron av vegetation eller vattenytor ökar det latenta värmeflödet, eftersom objekt likt dessa avger vattenånga genom processen *evapotranspiration*. Grimmond och Oke (1995) uppskattar att det latenta värmeflödet utgör ca. 30 % av stadens totala värmeflöde. Se figur 4 för en sammanställning av de faktorer som bidrar till värmeöffekten. Samtliga faktorer går att koppla till modifikationer av markenergin eller strålningsbalansen.

FAKTORER SOM BIDRAR TILL VÄRMEÖEFFEKTEN

1. Byggnadsväggar och vertikala ytor gör att strålning studsar mellan dessa och fastnar, vilket ökar andelen strålning som absorberas

- Ökad absorption av strålning beror inte enbart på stadsmaterialens låga albedo.

2. Låg himmelsfaktor bidrar till kvarhållande av infraröd strålning i gaturummet

- Himmelsfaktorn begränsas av de höga och kompakta byggnaderna i staden.

3. Staden har ett högre upptag av värme och en fördröjd frigörelse av värme på grund av dess byggnader och hårdgjorda material

- Det är inte enbart materialens termiska egenskaper som orsakar detta, utan även det faktum att strålning fastnar i gaturummet samt avsaknaden av vind.

4. Den mesta strålningen som absorberas av stadens ytor blir omvandlad till sensibel värme istället för latent värme

- Detta sedan fuktiga jordar och vegetation blivit ersatta av vattentäta ytor som saknar evaporativ förmåga.

5. Ökad frigörelse av sensibel- och latentvärme från transport, industriella processer och värme/kylningsystem i hushållen

- Värme och fukt frigörs också av den mänskliga metabolismen även om detta utgör en liten komponent av den totala energibalansen.

Figur 4. Modell över faktorer som bidrar till den urbana värmeö. Samtliga faktorer visar modifieringar av den urbana markenergi eller strålningsbalansen (Oke, 1982).

3.1.1.1 Albedo och emissivitet

När forskare världen över studerar hur värmeöeffekten kan mildras, är just studier på byggnads- och gatumaterialens egenskaper ett viktigt fält. Detta för att finna nya byggnadsmaterial med de egenskaper som krävs för att minska värmelagring och höga temperaturer i staden. Byggnadernas och gatornas material- och ytegenskaper är nämligen avgörande avseende hur mycket strålning som absorberas, hur snabbt materialet ökar i temperatur samt hur snabbt det avger värme till omgivande luft. Dessa egenskaper har en betydande effekt för värmeöns utveckling och storlek, både dagtid som kvällstid. Här är materialets *albedo*, *värmekapacitet* och *emissivitet* viktiga parametrar (Wong et al., 2008; Radhi, Assem & Sharples, 2014). Materialets albedo avgör hur mycket solstrålning ett material reflekterar eller istället absorberar. Värmekapaciteten beskriver ett materials förmåga att lagra värme, hur mycket värme som behövs för att det ska lagras i materialet. Medan emissiviteten beskriver hur snabbt ett material frigör energi (Maria, Rahman, Collins, Donsi & Sangiorgi, 2013; Thorsson, 2012).

Ett materials albedo anges ofta i procent eller på en skala 0-1 beroende på hur bra eller dåligt en yta reflekterar strålning. Ju högre andel solstrålning som ytan kan reflektera, desto högre är albedot (SMHI, 2015a). Bogren, Gustavsson och Loman (1999) betonar att albedot kan variera kraftigt mellan olika naturliga och artificiella material. Materialets reflektionsförmåga beror ofta på färgen eller ytans grov- eller släthet (Santamouris, 2013). Ljusa färger har lägre absorptionsförmåga av synlig strålning än mörka färger och ljusa färger har således högre albedo, vilket leder till minskad värmelagring. Absorptionsförmågan av infraröd strålning kan dock inte generaliseras

på samma sätt mellan ljusa och mörka färger. Även materialets yta, grov- eller släthet kan vara avgörande gällande hur mycket strålning det absorberar (Santamouris, 2013). I en studie som Santamouris deltog i tillsammans med Doulos och Livada (2004) jämfördes olika trottoarmaterial. Plattorna med slät yta visade sig då ha lägre temperatur än plattorna med ojämn och skrovlig yta. Geiger (1965) visade att albedot inte enbart påverkas av ytan, utan även av objektets fukthalt eftersom nyansen förändras vid olika fukthalter. Således kan albedot variera beroende på om objektet eller materialet är fuktigt eller torrt. Taha (1997) uppskattar att en stads albedo generellt ligger på 0.10-0.20 men betonar att detta varierar från stad till stad. Exempelvis har städer i norra Afrika högre albedo än städer i Amerika och Europa.

Emissiviteten anger materialets förmåga att sprida värme och avge långvågig strålning. Ett material med hög emissivitet har lättare för att avge värme när det utsätts för direkt solljus, än en yta med låg emissivitet. En yta med hög emissivitet är därmed svalare än en yta med låg emissivitet (Wong et al., 2008). Santamouris (2013) menar att emissiviteten är den viktigaste faktorn för ett objekts yttemperatur och att material med hög emissivitet har en betydligt lägre yttemperatur kvällstid än material med låg emissivitet. Thorsson (2012) förklarar att vanligt förekommande material i staden ofta har en låg emissivitet och att värmeöns kan mildras genom att använda material som har en hög emissivitet och som snabbt avger värme.

Maria et al. (2013) menar att gångytors yttemperaturer kan ligga på 20 - 30°C högre än sin omgivande lufttemperatur i varma klimat, som ett resultat av all solenergi som absorberats. Wong et al. (2008) är eniga om den stora skillnaden i yttemperatur och presenterar siffror på tak och markytor som uppmätts till 25 - 50°C högre än sin omgivande luft. Det går därmed att förstå varför byggnads- och gatumaterialen signifikant kan påverka stadens lufttemperatur. Flera års forskning har av denna anledning drivits för att finna nya sätt att modifiera vanligt förekommande material i staden med förhoppningen att lyckas minska värmeöns intensitet. Santamouris (2013) lyfter den forskning och utveckling som sker på gatumaterial, såsom betong och asfalt, avseende hur materialen ifråga kan bli mer reflektiva. Tanken bakom denna forskning är att modifiera materialens albedo genom att stryka på ett lager av färg som skapar en reflekterande hinna. Författaren (2013) menar att denna forskning främst riktar sig in på färg med olika egenskaper. De fyra områdena som är främst prioriterade är användningen av vit högrelekterande färg, användningen av färger som kan reflektera bort infraröd strålning, användningen av värmereflekterande färg samt användningen av färgskiftande färger.

Flera studier har undersökt hur materialets albedo kan modifieras för att sänka yttemperaturen. Bland dessa kan nämnas en studie av Akbari, Pomerantz & Taha (2001), som undersökte asfalt av varierande ålder och färg. Resultatet kunde visa att en ökning av asfaltens albedo med 0.25, kunde sänka yttemperaturen med 10°C. I en senare studie utförd i Kalifornien under juli och augusti, kunde Taha (2008) genom en simulering visa på liknande resultat. Resultaten visade att en modifiering av albedot med 0,1 på tak, 0,25 på väggar och 0,08 på markytor kunde åstadkomma en sänkning av yttemperaturen med 10°C. Vidare ledde denna modifikation till en sänkning av lufttemperaturen under dagen med 3°C. Maria et al. (2013) kunde efter en studie på betong och asfalt visa att gul färg ökade reflektiviteten vilket i sin tur sänkte yttemperaturen. Asfalten fick lägre yttemperatur tillskillnad från den målade betongen. Däremot fick den målade betongbiten som helhet, en mer homogen och svalare temperatur än den omålade betongbiten i testet. Författarna (ibid.) kunde därefter konstatera att den gula färgen kunde fungera som ett skyddande lager mot värmelagring, fast på olika sätt, i materialen.

Trots att det finns många studier likt dessa som visar att högreflektiva material kan sänka både yt- och lufttemperaturer, lyfter Taleghani, Tenpierik, Debbelsteen och Sailor (2014) en annan sida. I en studie på bostadsgårdar i Nederländerna kunde författarna konstatera att en höjning av albedo på bostadsgårdens fasader ökade strålningstemperaturen, som är den viktigaste meteorologiska parametern som påverkar människans termiska komfort och energibalans (Thorsson, 2012). Strålningstemperaturen kan beskrivas som den sammantagna summan av kort- och långvågig strålning som människan exponeras för (Mayer & Höppe, 1987). Vidare problematiserar Yang, Wang och Kaloush (2015) hur högreflektiva material kan påverka omgivande byggnader. Författarna (ibid.) menar att all den strålning som de högreflektiva materialen reflekterar bort, kan komma att påverka omgivande byggnader då lufttemperaturen kring dessa riskeras höjas. Detta kan leda till ett ökat kylningsbehov och därmed ökad energiförbrukning i byggnaderna. Den positiva effekten av högreflektiva material kan av denna anledning bli mindre än förväntat.

Varje plats i staden har olika förutsättningar avseende geografi, byggnadernas geometri, element i den direkta omgivningen, etc. En lösning för en stad gäller sällan för samtliga städer världen över. För att minska värmeöns intensitet menar Yang, Wang och Kaloush (2015) att det krävs flera olika tekniker och tillvägagångssätt än enbart högreflektiva material och att den bästa kombinationen av dessa kan komma att variera beroende på stadens specifika förutsättningar.

3.1.1.2 Luftföroreningar

Stadens intensiva trafik och industri genererar en stor andel luftföroreningar som genom låga vindhastigheter, stannar mellan stadens byggnader och bidrar till försämrad luftkvalité (Oke, 1987). Vinden är en avgörande parameter för hur luftföroreningar kommer att spridas eller fastna mellan stadens höga husväggar (Oke, 1987). Generellt försvårar hög och tät bebyggelse för vinden att komma åt och transportera bort partiklar och föroreningar till omgivande luftflöde ovan taken. Det vertikala luftutbytet fungerar tämligen dåligt i alltför hög och tät bebyggelse. Risker är således stor att partiklarna och föroreningarna kommer cirkulera inom gatukanjonen och fastna mellan byggnadernas väggar, istället för att blandas ut med omgivande luftströmmar (Ahmad, Khare & Chaudhry, 2005). Airola och Myllynen (2015:4) definierar en gatukanjon som *“en gata som omges på båda sidorna av höga byggnader eller konstruktioner som bildar en tät mur”*. Vidare förklarar författarna (ibid.) att relationen mellan byggnadernas höjd och gatans bredd är avgörande för hur föroreningarna kommer spädas ut i luften. Ju större relationen mellan höjd och bredd är, desto sämre späds föroreningarna ut.

Landsberg (1981) beskriver hur det över staden kan bildas ett moln av luftpartiklar och föroreningar. Geiger (1965) pekar på hur biltrafiken ökar nivån av luftföroreningar när bilarnas däck blandar upp luftpartiklar i luften, från dammet på vägarna. Vidare menar Konijnendijk et al. (2005) att biltrafiken även bidrar till utsläpp av kväveoxider, ozon och lättflyktiga organiska föroreningar. Wong et al. (2008) förklarar att halten av marknära ozon höjs ytterligare när lufttemperaturen stiger. Av denna anledning är den marknära ozonhalten oftast högre i staden när vädret är soligt och varmt. Enligt Oke (1987) kommer molnet som föroreningarna utgör, absorbera både den inkommande och utgående kort- och långvågiga strålningen och således påverka stadens totala strålningsbalans. Det är främst den kortvågiga strålningen som filtreras bort av den förorenade luften och den strålning som ändå lyckas tränga igenom molnet kommer splittras, och istället nå marken som diffus strålning (Oke, 1987). Stadens höga halter av luftföroreningar påverkar även antalet soltimmar i en stad jämfört med sitt omgivande landskap. Landsberg (1981) hävdar att en industristad kan ha 10-20 % mindre andel soltimmar i jämförelse med sitt omgivande landskap.

3.1.2 Stadens vindklimat

Vinden och dess framfart i stadslandskapet är en faktor som starkt påverkar de lokala klimat som uppstår i staden. Vindens närvaro eller frånvaro kan vara avgörande huruvida en plats upplevs behaglig eller inte och detta kan variera beroende på årstid. Objekt i stadslandskapet såsom byggnader eller vegetation modifierar vindens hastighet och riktning genom att antingen intensifiera, minska eller helt eliminera den (Brown & Gillespie, 1995). Generellt är vindhastigheterna i städer lägre i jämförelse med omgivande landsbygd, då stadens bebyggelsegeometri bromsar upp de regionala vindarna (Oke, 1987; Landsberg, 1981). I staden kan det dock uppstå lokala vindar som bryter detta mönster. Byggnadernas höjd, form samt avstånd till varandra är betydelsefullt för hur den marknära vinden kommer utvecklas och antingen minimeras eller intensifieras (Holmer, 1978 se Thorsson, 2012, s. 22).

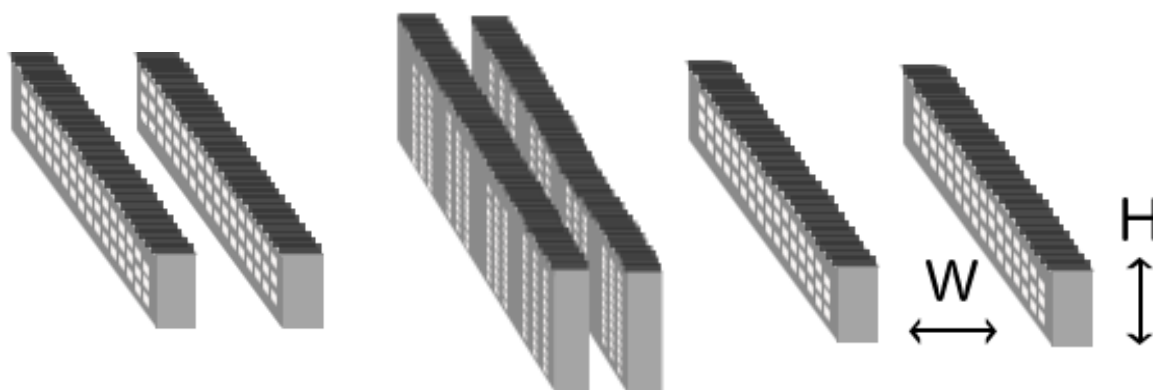
Exempelvis orsakar byggnader som är betydligt högre än sin omgivande bebyggelse, blåsig förhållanden vid marknivå. Den höga byggnaden kommer nämligen föra ner stora luftmassor till gatunivå. Av denna anledning uppstår det ofta höga vindhastigheter framför höghus, särskilt i de fall där byggnaden mittemot står närmare än höghusets höjd. Detta är en vanligt förekommande situation på öppna platser, såsom på ett torg där det finns en hög byggnad med lägre bebyggelse runtomkring (Glaumann & Westerberg, 1988). I andra typer av bebyggelse som exempelvis områden med jämnhöga byggnader, kommer vinden utvecklas annorlunda. Hur vinden påverkar gaturummet beror på flera olika faktorer men som tidigare nämnt är det främst byggnadernas geometri, höjd och avstånd till varandra som avgör utfallet. Kunskap om hur dessa faktorer påverkar gatuklimatet är viktig för att redan i planeringsfasen kunna ta hänsyn till vindens flöde för att kunna bygga "rätt" från början. Men även vid planeringen av befintliga områden som redan har en inbyggd problematik, är denna kunskap viktig för att kunna modifiera situationen i efterhand. Glaumann och Westerberg (1988) poängterar dock att det alltid är svårare att modifiera i efterhand än att bygga rätt från början.

Vilka bebyggelsemönster som är önskvärda för att skapa de bästa förutsättningarna för ett behagligt gatuklimat, beror framförallt på vilken klimatzon staden ligger i eftersom detta påverkar dess problembild. Den geometri som skapar ett behagligt klimat i en stad, kan ge motsatt effekt i en annan stad. Exempelvis kan solens strålar vara positiva för städer med kallare perioder, medan de kan orsaka låg komfort i städer med varmare perioder och här kan vindens närvaro istället öka komforten. Vad som är önskvärt och skapar bästa komfort avseende solstrålning och vind kan även variera under året i de städer som har både varma och kalla perioder (Johansson, 2006). Av denna anledning är det viktigt att belysa vilka faktorer bakom stadens geometri som påverkar strålningen och vinden på olika sätt för att få förståelse för vilken geometri som är fördelaktig respektive ofördelaktig i olika situationer. Nedan sker en genomgång av faktorer som *aspect ratio*, *gatornas orientering* och *himmelsfaktor*. Dessa faktorer har i flera studier visat sig ha en betydande effekt för vilket klimat som uppstår lokalt i en gatukanjon.

3.1.2.1 Aspect ratio

Aspect ratio (H/W) är en engelskt begrepp som Oke (1988) definierar som förhållandet mellan den genomsnittliga höjden på gatukanjonens väggar (h) och gatukanjonens bredd (w). Ahmad, Khare och Chaudhry (2005) förklarar att en gatukanjon anses enhetlig när värdet är lika med 1, *låg* när värdet motsvarar 0,5 och *djup* vid värdet 2 eller högre. Se figur 5 för exempel på olika gatukonfigurationer med olika *aspect ratio*. Det finns även ett mått som kallas *building ratio* (L/W) och som kan användas i kombination med *aspect ratio*. Ali-Toudert (2005) förklarar att detta

värde avser längden och bredden på gatukanjonen. Genom att använda aspect- och building ratio går det således att avgöra gatukanjonens höjd, bredd och längd.



Figur 5. Illustration av hur olika konfigurationer av aspect ratio kan se ut i en stad.
Illustration: Författaren (2016).

Geros et al. (2005) kunde i en studie visa att djupa gatukanjoner (höga byggnader som står tätt) har en högre lufttemperatur kvällstid, vilket bidrar till ett sämre klimat sommartid. Detta på grund av att värmen fastnar mellan byggnaderna, vilket förstärks av att vindflödet inte når ner i djupa gatukanjoner. Det finns även studier som visar på motsatt utfall under dagtid, då djupare gatukanjoner visat sig ha lägst yt- och lufttemperaturer i varma klimat. En studie av Johansson och Emmanuel (2006) visade att klimatet i Colombo på Sri Lanka blev behagligare när byggnaderna var höga och stod tätt. Bourbia och Boucheriba (2010) kunde uppvisa liknande resultat i en studie som utfördes i Algeriet, då de djupaste gatukanjonerna i studien hade de lägsta luft- och yttemperaturerna under dagtid. Även Johanssons (2006) studie som utfördes i Fez i Marocko, visade att gatukanjoner med högt aspect ratio var mer fördelaktiga framför lägre gatukanjoner, för att uppnå ett behagligt sommarklimat dagtid. Att höga byggnader skapar lägre temperaturer i varma klimat under dagtid, går delvis att koppla till deras förmåga att skymma solens strålar och skuggbelägga gatan (Perini & Magliocco, 2014).

Hur byggnaderna skuggbelägger gatukanjonen eller möjliggör för solinsläpp påverkar även strålningstemperaturen som i hög grad påverkar människans termiska komfort och energibalans (Mayer & Höppe, 1987). Förutom att städer behöver hög bebyggelse under varma dagar för att skapa skugga och lägre strålningstemperaturer, poängterar Johansson (2006a) att städer som även har kallare perioder behöver lägre gatukanjoner och öppna ytor för att skapa tillgång till solens strålar för att höja komforten under vintertid. Detta faktum belyser vikten av att städer som har både varma och kalla perioder, som Sverige, behöver kunna erbjuda båda delarna för ett behagligt klimat året om. Johansson (2006a) poängterar dock att det är lättare för befolkningen att klä sig rätt och därmed anpassa sin termiska komfort under kalla perioder. Under varma perioder när det är svårt att hitta skugga kommer inte klädvalet kunna påverka den termiska komforten i samma utsträckning.

En gatukanjons aspect ratio har även betydelse för vindens flöde, då det kontrollerar luftströmmarna. Geros et al. (2005) menar att höga byggnader som står väldigt tätt, hindrar vinden från att söka sig in och ner i gaturummet. Vidare förklarar Oke (1987) hur byggnadernas höjd och avstånd till varandra kommer påverka luftströmmarna när vinden ligger vinkelrätt mot

gatukanjonen. Författaren lyfter tre exempel på hur luftströmmarna kan komma att utvecklas i gaturummet och kallar dessa regim I, II och III.

Oke (1987) förklarar att vindströmningen i regim I inte påverkas av de olika byggnadernas närvaro i landskapet, då avståndet mellan byggnaderna är för stort. Lä- och lovartsidan av respektive byggnad kommer således inte påverka varandra, utan samma luftströmning hade uppstått om byggnaderna stått helt isolerade från varandra (Ali-Toudert, 2005). Ahmad, Khare och Chaudhry (2005) menar att denna situation uppstår när värdet på aspect ratio är 0,05 eller mindre. När byggnadernas höjd ökar och avståndet mellan dem krymper, sker en övergång till regim II (Oke, 1987). Ali-Toudert (2005) menar att luftvakarna vid lä- och lovartsidan på respektive byggnad då kommer påverka och förstärka varandra, tillskillnad från regim I. Ahmad, Khare och Chaudhry (2005) menar att detta uppstår då värdet på aspect ratio når upp till 0,65.

I regim III när byggnadernas höjd ökat och avståndet mellan dem krympt ytterligare, kommer luftflödet som uppstår i kanjonen isoleras från luftflödet ovan byggnaderna. I denna situation etableras en stabil cirkulär virvel som är lika bred som gatukanjonen (Ali-Toudert, 2005). Vinden ovan gatan förs nu ned utmed bortersta byggnadens vägg och fortsätter sedan i ett cirkulärt flöde efter att luftströmningen nått byggnadsväggen mittemot (Ahmad, Khare & Chaudhry, 2005). Ali-Toudert (2005) poängterar att regim III är mest vanlig i stadsmiljö, där hög och tät bebyggelse är vanligt förekommande. Ahmad, Khare och Chaudhry (2005) menar att denna regim uppstår då värdet på aspect ratio är över 0,65.

3.1.2.2 Gatornas orientering

Gatornas orientering, hur de ligger i förhållande till väderstrecken, påverkar tillgången på inkommande solstrålning samt hur luftströmningen utvecklas. Gatornas orientering är därmed en avgörande parameter som påverkar klimatet på gatunivå. Flera studier har gjorts avseende vilken riktning som är den mest fördelaktiga för ett behagligt gatuklimat under varma perioder och då har gator med en nord/sydlig orientering i många fall visat sig mest fördelaktiga (Jansson, 2006; Shashua-Bar & Hoffman, 2004). Detta eftersom gator med en öst/västlig orientering är mer långvarigt exponerade för sol under sommarhalvåret än gatorna som är nord/sydligt orienterade. Detta påstående stärks av en holländsk studie som genom en simulering kunde visa att en öst/västligt riktad gata fick 12 timmar sol, medan en nord/sydligt riktad gata fick 4 timmar sol. Författarna kunde därefter påstå att den nord/sydligt riktade gatan fick mest behagligt klimat på en rekordvarm sommardag (Taleghani, Kleerekoper, Tenpierik & Van den Dobbelsteen, 2015).

Shashua-Bar och Hoffman (2004) kunde också konstatera att nord/sydligt riktade gator fick något bättre termiskt klimat än öst/västligt riktade gator och att denna effekt ökar desto bredare gatan är. De kunde också konstatera att en modifikation av materialens albedo, ledde till störst sänkning av lufttemperatur i nord/sydligt riktade gator, under varmaste tidpunkten på dagen (15:00). Trots att många studier visar liknande resultat, finns det även studier som visar det motsatta. Elnahas (2003) kunde i sin studie som utfördes på värden mätta i Adelaide, Australien, visa att öst/västligt orienterade gator var mest fördelaktiga för ett behagligt klimat. Genom dessa motvisande resultat, går det att poängtera hur stadens geografiska placering i världen är avgörande avseende vilken orientering på gatorna som är mest fördelaktiga för staden ifråga.

Gatornas riktning har även en avgörande effekt på vindhastigheten och luftströmningen inom gatukanjonen. Oke (1987) lyfter här den parallella vindriktningen som mest extrem, då den tillskillnad från en vinkelrät anblåsning inte skyddas av gatukanjonens väggar. I de situationer som

vinden blåser i samma riktning som gatans orientering, uppstår en vindtunnel och vinden kan då komma att intensifieras och accelerera (Oke, 1987). Ali-Toudert (2005) förklarar processen bakom hur vinden accelererar, som att vindhastigheten till en början avtar desto längre nedför gatan den kommer. Detta orsakas av friktionen från gatukanjonens ytor. Denna friktion orsakar även uppriktade vindar som går längsmed gatans väggar. Vid en kritisk punkt, beroende på gatukanjonens aspect ratio, kommer dock vindflödet att börja accelerera igen när luftströmmar ovan byggnadernas tak trycker på i nedgående riktning. Denna process kommer intensifieras i gatukanjoner med hög aspect ratio, vilket innebär att vindhastigheten kommer öka i relation med att värdet av aspect ratio ökar. Utifrån detta kan slutsatsen dras att ju högre och trängre gatukanjonen är, desto högre vindhastighet uppstår när anblåsningen är parallell med gatukanjonens axel. Vid parallellt vindflöde kommer det uppstå starkare vindar vid hörnen på gatans slut, än vid hörnen på gatans ingång (Ali-Toudert, 2005). Detta är ett faktum som starkt kan påverka komforten vid byggnadernas olika hörn, vilket är en viktig kännedom för fysiska planerare.

3.1.2.3 Himmelsfaktorn

Som tidigare nämnt har himmelsfaktorn (sky view factor) i många fall visat sig ha en betydande effekt på gatuklimatet, då den påverkar inkommande- och utgående strålning och därmed stadens strålningsbalans. Himmelsfaktorn kan förklaras som den mängd av himlen som är exponerad från en given punkt i landskapet (Oke, 1987). Ofta mäts himmelsfaktorn med hjälp av ett fiskögeobjektiv som placeras på marknivå (Svensson, 2004). Vid tät och hög bebyggelse kommer himmelsfaktorn av förklarliga skäl att vara mindre än vid öppnare ytor som inte har några täckande objekt. Mycket forskning har drivits för att studera förhållandet mellan värmeöns storlek och himmelsfaktorn och relationen har både visat sig vara stark och svag. Yamashita et al. (1986) kunde i sin studie konstatera att himmelsfaktorn är en god indikator som är avgörande för den urbana värmeöns storlek. Oke, Johnson, Steyn och Watson (1991) fann samma resultat i en studie där de använde himmelsfaktorn för att mäta intensiteten av den urbana värmeön. De kunde då konstatera att denna parameter har betydelse för hur mycket utgående långvågig strålning som kan sändas tillbaka till atmosfären, vilket är kopplat till värmeöns storlek kvällstid. Svensson (2004) studerade vilken effekt himmelsfaktorn har på lufttemperaturen i staden och kunde då konstatera ett relativt starkt förhållande mellan himmelsfaktorn och lufttemperaturer, under klara vindstilla kvällar.

Eliasson (1996) menar dock att det inte enbart går att studera himmelsfaktorn för att förklara temperaturskillnader som uppstår i staden. Stadens klimat är komplext och således finns det fler faktorer som är avgörande för värmeöns storlek, som exempelvis den specifika platsens material- och ytegenskaper. Upmanis (1999) är enig med påståendet och kunde i en egen studie konstatera att himmelsfaktorn hade obetydlig inverkan på stadens lufttemperatur under ett år i Göteborg. Däremot gick det att konstatera en större relation mellan himmelsfaktor och ytemperatur, särskilt vintertid då variationerna i ytemperatur till 65 % kunde förklaras med himmelsfaktorn. I studien kunde dock inget tillräckligt tydligt samband uppmätas mellan yt- och lufttemperaturer och därmed gick det inte att dra slutsatsen att himmelsfaktorn på egen hand, påverkar stadens lufttemperaturer. Upmanis (1999) påpekar därmed att det krävs fler metoder för att studera vad blockering av himmeln kan ge för effekter på stadsklimatet.

3.1.3 Stadens luft- och markfuktighet

Generellt har staden låg fuktighetsnivå i jämförelse med omkringliggande landsbygd, framförallt avseende markfuktigheten. Stadens höga andel hårdgjorda och ogenomträngliga ytor leder fort

bort dagvatten till omkringliggande brunnar och förhindrar infiltration, vilket leder till låg markfuktighet (Oke, 1987; Geiger, 1965). Skillnaderna i luftfuktighet är dock inte lika påtagliga, varken inom staden ifråga eller i jämförelse med den omgivande landsbygden (Oke, 1987). De små variationer som uppstår i bebyggda områden, beror framförallt på skillnader i evapotranspirationen och den vertikala omblandningen av luft (Thorsson, 2012). Platser som innehåller permeabla markytor eller är belägna nära vegetativa ytor har av den anledningen en högre mark- och marknära luftfuktighet än de områden som består av hårdgjorda ytor (Givoni, 1991). Vidare menar Oke (1987) att luftfuktigheten i allmänhet är låg under dagen, för att bli något högre under kvälls- och nattid i jämförelse med omkringliggande landsbygd. Att luftfuktigheten ökar på kvällen kopplar Thorsson (2012) dels till stadens höga temperaturer som orsakar fortsatt evapotranspiration under natten, men även till de antropogena utsläppen av vattenångor orsakat av trafikens, fabrikernas och bostädernas utsläpp.

Många forskare har studerat kopplingen mellan evapotranspiration, luftfuktighet och ökad komfort i stadsmiljön under varma dagar. Flera av dessa studier är kopplade till de vegetativa ytornas inverkan och potentiella effekter på stadsklimatet. Givoni (1991) som studerat dessa kopplingar menar att ökad luftfuktighet i städer ibland kan vara önskvärt men att det även finns situationer där det bör undvikas. I torra klimat skapar platser med hög mark- och luftfuktighet, som exempelvis parker, minskade yt- och marknära lufttemperaturer vilket bidrar till ett behagligare klimat för människan att vistas i under varma dagar. Eftersom förekomsten av evapotranspiration generellt sett är låg i torra klimat, är ytor som möjliggör för denna process högst önskvärda. Dock kan en ytterligare förhöjning av luftfuktigheten bidra till minskad komfort i städer som redan har ett fuktigt klimat. I dessa fall bör vindtillförseln prioriteras framför fuktillförseln, då vinden är det primära som kan öka komforten i fuktiga klimat (Givoni, 1991). Förutom att bidra med högre mark- och luftfuktighet har närvaron av stadsträd och vegetativa ytor visat sig bidra med positiva effekter på stadsklimatet, ur flera avseenden. Effekter som kan vara avgörande för att lyckas anpassa och förbereda städer för ett föränderligt klimat. Gill, Handley, Ennos och Pauleit (2007) poängterar att utvecklingen av stadens grönstruktur är en av de mest lovande strategierna för att anpassa städer för kommande klimatförändringar, såsom ökad nederbörd och högre temperaturer. Författarna (ibid.) menar att det är svårt att addera stora grönområden i städer som redan består av mycket befintlig bebyggelse och att det krävs en kreativ utveckling av grönstrukturen. Det är därmed nödvändigt för fysiska planerare att kontextanpassa vegetationen beroende på platsspecifika förutsättningar för att kunna göra det mesta av de möjligheter som finns. Författarna (ibid.) exemplifierar med olika typer av vegetation som fasadvegetation, gröna tak och stadsträd samt hur gator eller järnvägslinjer kan göras om till gröna stråk. Att addera stadsträd och vegetation är således ett sätt att modifiera och anpassa stadsklimatet, särskilt vid befintlig bebyggelse, utan att behöva göra stora infrastrukturella insatser och förändringar.

3.2 Vegetationens inverkan på stadsklimat

Många forskare har studerat relationen mellan hårdgjorda urbana och vegetativa ytor i staden och flera av resultaten är entydiga och visar att temperaturen blir lägre vid högre kvantiteter av vegetativa ytor under både dag- och nattid. En av de starkaste anledningarna till detta är att vegetation inte lagrar värme från solens strålar och värmer omgivande luft i samma utsträckning som gatu- och byggnadsmaterialen gör. Vegetativa delar omsätter istället en del av den inkommande strålningen till avdunstning, vilket höjer stadens luftfuktighet (Boukhabla & Alkama, 2012; Dimoudi & Nikolopoulou, 2003; Whitford, Ennos & Handley, 2001). Det förekommer även mindre andel långvågig strålning i vegetativa ytor (Givoni, 1991) vilket bidrar

till minskad strålningsvärmebelastning för människor. En annan viktig aspekt är att vegetativa ytor fångar upp regnvatten och möjliggör infiltration, tillskillnad från de hårdgjorda ytorna som snabbt avleder dagvatten till brunnarna (Whitford, Ennos & Handley, 2001).

Upmanis, Eliasson och Linqvist (1998) kunde i en studie i Göteborg uppmäta temperaturskillnader på 5,9°C mellan en park och en hårdgjord yta under nattid. Författarna kunde även konstatera att den kyligare luften som uppstått i parken, kunde sprida sig med en räckvidd på 1100 m utanför parkens gränser. Shashua-Bar och Hoffman (2000) fick liknande resultat i en studie i Tel Aviv, Israel, där små grönytor visade sig ge en svalkande effekt uppemot 100 meters räckvidd från parkens gränser. Baserat på detta resultat menar författarna att grönytor på 0,1 ha med fördel kan planeras in med 200 meters mellanrum i hela staden, för att mest effektivt kunna utnyttja den kylande effekten. Även Givoni (1991) samt Hunjo och Takakura (1990) poängterar att vegetationens positiva inverkan på stadsklimatet utnyttjas mest effektivt genom flertalet mindre och jämt utspridda parker, framför fåtalet stora.

Hur vegetation fungerar värmesänkande har engagerat många forskare världen över och flera av resultaten tyder på att stadsträd och annan typ av vegetation fyller multipla funktioner och har positiva effekter på stadsklimatet ur flera olika aspekter. Glaumann och Nord (1993) sammanfattar vegetationens förmåga att modifiera klimatet genom dess förmåga att påverka sol- och skuggförhållanden, vindhastighet, luftfuktighet och markens upptagning och lagring av värme. Särskilt stadsträd har visat sig framgångsrika avseende att skapa ett behagligt mikroklimat i sin direkta närmiljö. Stadsträd har förmågan att direkt skugga underliggande ytor och skapa svalare miljöer för människan som vistas undertill (Konijnendijk et al., 2005) samtidigt som solstrålning hindras att nå underliggande material och absorberas vilket i sin tur även minskar den utgående långvågiga strålningen (Shashua-Bar, Pearlmutter & Erell, 2011). Vidare har stadsträd och annan typ av vegetation förmågan att sänka lufttemperaturen genom att addera högre luftfuktighet genom evapotranspirationsprocessen (Konijnendijk et al., 2005). Stadsträd och vegetation kan även modifiera vind och antingen möjliggöra eller minimera förekomsten av vind beroende på dess placering (Brown & Gillespie, 1995).

Det finns även många studier som visar att stadsträd och vegetation kan rena luften från partiklar och föroreningar (Tallis, Taylor, Sinnet & Freer-Smith, 2011), minska flödestoppar vid stora nederbördsmängder (Boukhabla & Alkama, 2012) samt bidra till minskad stress och ökat välbefinnande hos människor (Hartig, 2005). Dessa effekter kommer inte diskuteras ytterligare, utan nämns för att ge ytterligare exempel på de många positiva effekter som stadsträd och vegetation visat sig ha i stadsmiljön. För att skapa en större förståelse för hur stadsträd och vegetation kan modifiera stadsklimatet, vilka effekter som kan uppstå, kommer det nedan ske en genomgång av vegetationens förmåga att skapa *skugga*, *evapotranspiration* samt *modifiera vind*.

3.2.1 Skugga

Den mest konkreta funktionen som stadsträd har på stadsklimatet är att direkt skugga underliggande ytor såsom gator, väggar och tak. På detta vis hindras inkommande strålning att nå underliggande material och absorberas för att sedan avges som värme, samtidigt som den direkta skuggan skapar ett behagligare klimat för människan som inte träffas av solens varma strålar under dagen. Stadsträd har därmed förmågan att reducera både kort- och långvågig strålning, vilket sammantaget bidrar till minskad värmebelastning för människan under hela dygnet (Shashua-Bar, Pearlmutter & Erell, 2011; Dimoudi & Nikolopoulou, 2003). När stadsträd skuggar byggnadsväggar och tak tyder forskningsresultat på att energiförbrukningen sänks i byggnaden, då

kylningsbehovet inomhus sänks (Akbari, Pomerantz & Taha, 2001). Skapandet av skugga anses vara den viktigaste åtgärden för att skapa ett behagligt klimat för människan under varma dagar (Brown, Vanos, Kenny & Lenzholzer, 2015) och modifiering av vinden blir då sekundär (Brown & Gillespie, 1995). Shashua-Bar och Hoffman (2000) är eniga och kunde i en studie på 11 mindre grönytor i Tel Aviv, Israel, konstatera att 80 % av vegetationens kylande effekt kom ifrån trädens skuggande förmåga.

Många studier visar att byggnads- och gatumaterialens ytemperatur kan sänkas drastiskt när de beskuggas av stadsträd. Armson, Stringer och Ennos (2012) kunde i en studie utförd i Manchester, England, uppmäta att markytor av betong kunde uppnå en ytemperatur som var 18 - 23°C varmare än lufttemperaturen (som max. uppnådde 23,5 - 25°C). I trädens skugga kunde betongens ytemperatur sänkas med 12 - 19°C mellan de olika studieområdena som bestod av mindre grönytor och en större park. Anmärkningsvärt var att gräsets ytemperatur vid full solexponering, var lägre än lufttemperaturen i de små grönytorna och enbart 3°C varmare än lufttemperaturen i den större parken. Detta resultat visar att gräsytor ytemperatur kan vara upp mot 24°C lägre än hårdgjorda material som asfalt och betong vid full solexponering. Vidare kom trädens skuggande effekt att sänka gräsets ytemperatur ytterligare, till 4 - 7°C lägre än omgivande lufttemperatur. Resultatet tyder på att träd i kombination med gräs har stor potential att skapa kyligare oaser i staden, med en ytemperatur som kan bli lägre än omgivande lufttemperatur.

Även Shashua-Bar, Pearlmutter och Erell (2011) kunde uppvisa liknande resultat i en studie utförd i Israel. Träd som skuggade gräs skapade störst temperatursänkande effekter för både yt- och lufttemperaturen. Även i denna studie hade gräset en lägre ytemperatur än omgivande lufttemperatur när det skuggades av ett träd. Författarna (ibid.) kunde även konstatera att gräsets vattenförbrukning kunde sänkas med 50 % när det blev skuggat, vilket är en viktig kunskap ur ett förvaltningsperspektiv eller i de klimat där nederbörden och vattentillgången är låg. I en studie utförd i Nederländerna framgick det att trädens skuggande förmåga drastiskt kunde sänka strålningstemperaturen, vilket är en viktig meteorologisk parameter för människans energibalans och termiska komfort (Klemm, Heusinkveld, Lenzholzer & van Hove, 2015; Thorsson, 2012). Generellt menar författarna (ibid.) att en gata med 10 % täckningsgrad från trädkronor kan sänka strålningstemperaturen inom gatukanjonen med 1°C. Stora eller täta trädkronor kommer av förklarliga skäl att ge större beskuggning och således sänka strålningstemperaturen mer än vad mindre eller glesa trädkronor gör. Oke (1987) förklarar att trädets höjd, täthet och art är avgörande för hur mycket strålning som når underliggande ytor. Trädartens transmissivitet, genomsläpplighet, är därmed relevant då den beskriver hur stor andel kortvågig strålning som passerar genom kronan till underliggande ytor (Konarska et al., 2013).

Ett träd transmitterar alltid viss strålning och för lövfällande arter är skillnaden stor om det är sommar- eller vintertid. En stor del av den strålning som träffar trädets krona kommer antingen reflekteras tillbaka direkt eller absorberas av kronan. Resterande strålning som når underliggande ytor uppskattar Oke (1987) till mindre än 20 % men det kan även vara så lågt som 5 % beroende på art, täthet och höjd. Lövträd som står i full lövskrud har högst albedo av all typ av vegetation medan barrträd har jämförelsevis låg albedo (Oke, 1987). Kännedomen om olika trädarters varierande transmissivitet är en viktig kunskap för att kunna kontextanpassa trädvalet efter platsens behov, beroende på om det behövs hög andel skugga eller tillgång till sol för ökad komfort. Denna kunskap kan vara av vikt för att kunna bestämma vilken trädart som är mest lämplig på en plats där stor andel skugga efterfrågas. Brown och Gillespie (1995) menar att en *Acer platanoides* har låg genomsläpplighet av ljus (5 - 14 %) detsamma gäller arter som *Juglans nigra*

(9 %), *Aesculus hippocastanum* (8- 27 %), *Tilia bordata* (7 - 22 %) och *Betula pendula* (14 - 24 %). Vidare lyfter författarna (ibid.) *Gleditsia triacanthos f. inremis* (25 - 50 %), *Quercus alba* (13 - 38 %) och *Picea pungens* (13 - 28 %) som arter med högre genomsläpplighet av ljus.

Mått som *Leaf Area Index* (LAI) och *Leaf Area Density* (LAD) kan ge en fingervisning om hur täckande trädartens krona är. LAI definieras ofta som halva totalytan av bladet, som har möjlighet till interception per enhet markyta (Chen & Black, 1992). LAI varierar beroende på växtens storlek, ålder och art men även av omgivningens karaktär (Mcpherson, Nowak & Rowntree, 1994). LAD, bladyteindex på svenska, kan beskrivas genom hur bladen är fördelade i kronans vertikala profil (Eschenbach & Kappen, 1996; Carfan et al., 2011). Dessa värden kan sammantaget beskriva hur tät trädets krona är, vilket kan ge en fingervisning om hur väl trädarten kan skugga underliggande ytor. Som tidigare nämnt varierar dessa värden på lövfällande arter under året, då de tappar sina blad vintertid. Ur ett klimatreglerande perspektiv är lövfällande arter funktionella i ett svenskt klimat som har både kalla och varma månader. Lövträden kan då ge skugga sommartid, men möjliggöra för solens strålar vintertid när löven fallit av.

3.2.2 Evapotranspiration

Flera studier tyder på att vegetation och mark kan bidra med förhöjd luftfuktighet och sänka yt- och lufttemperaturer genom evapotranspirationen (Givoni, 1991; Dimoudi & Nikolopoulou, 2003). *Evapotranspiration* kan definieras som den sammantagna och totala processen av den avdunstning som sker från vattenkroppar, mark och vegetation genom processerna *evaporation* och *transpiration*. Rosenberg, Blad och Verma (1983) definierar *evaporation* som avdunstningsprocessen när en vätska omvandlas till gasform och att processen förekommer vid vattenkroppar, jord/mark och blöt vegetation efter exempelvis ett regnfall. Vidare förklarar författarna (ibid.) *transpiration* som den avdunstningsprocess som sker efter att vatten passerat igenom en växt. Detta sker när vegetation tar upp vatten i marken med sina rötter som sedan vandrar upp och ut i växtens olika delar, för att slutligen komma ut ur klyvöppningarna (stomata) i bladen och spridas till omgivande luft genom avdunstning. Eftersom det är svårt att avgöra om avdunstningen skett från *evaporation*- eller *transpirations*processen för en specifik plats benämns ofta avdunstningsprocessen i helhet som *evapotranspirations*processen.

Stomata eller klyvöppningar kan förklaras som de porer som finns på växtens blad, med funktionen att reglera gasutbytet mellan växten och dess omgivning. Klyvöppningarna är ofta stängda på kvällen när det är mörkt och öppna under dagen när solen skiner. Detta kan dock variera beroende på faktorer som ljusintensitet, omgivande temperatur, fuktighet samt koldioxidkoncentration i växten. Exempelvis kan klyvöppningarna stängas om det råder vattenbrist i marken, som en strategi för att undvika uttorkning (Oke, 1987; Geiger, 1965). Generellt öppnas klyvöppningarna mer vid högre temperaturer än vid låga temperaturer (Rosenberg, Blad & Verma, 1983) men Dimoudi och Nikolopoulou (2003) hävdar att detta faktum ändras vid väldigt höga temperaturer. I en studie kunde författarna (ibid.) visa att växtens möjlighet till *transpiration* vid temperaturer över 40°C är lika låg som den vanligtvis är vintertid. Resultatet tyder på att vegetationens förmåga att transpirera inte fungerar ultimat i extremt varma klimat och i dessa fall kan det krävas andra strategier för att öka komforten i stadsmiljön, än att utnyttja växternas förmåga till *transpiration*. Watkins, Palmer och Kolokotroni (2007) föreslår att torktålig vegetation kan användas i dessa fall, för att istället utnyttja vegetationens skuggande förmåga till att skapa behagligare klimat.

Markens och vegetationens förmåga till evapotranspiration beror på flera olika faktorer. Först och främst påverkas evapotranspirationen av mängden tillgängligt vatten i marken. Är vattentillgången i marken låg, kommer inte vegetationen transpirera och inte heller marken evaporera i samma utsträckning som när vattentillgången är god (Rosenberg, Blad & Verma, 1983; Watkins, Palmer & Kolokotroni, 2007). Även luftfuktigheten kan påverka evapotranspirationen. När luften är torr kommer marken och växterna evaporera respektive transpirera i högre utsträckning än om luften är väldigt fuktig. Detta bortsett från de situationer när det är extremt torrt eftersom stomata, som tidigare nämnt, kommer sluta sig för att skydda växten från uttorkning. Även luft- och ytemperaturen har en stark inverkan på evapotranspirationen. När luft- och ytemperaturen (av ytan som evaporerar) är hög är generellt evaporationshastigheten större än när temperaturen är låg. Detta eftersom varm luft kan hålla fukt (ånga) bättre än kall luft samt för att evaporationen är beroende av hur mycket värme som överförs, vilket innebär att processen får högre hastighet vid högre temperaturer. Vidare kan höga ytemperaturer öka evapotranspirationen då det krävs mindre energi att evaporera varmt vatten än kallt vatten (Rosenberg, Blad & Verma, 1983).

Ovan nämnda faktum indikerar att evapotranspirationen fungerar som bäst vid höga temperaturer och förhållandevis torra klimat, vilket underbygger argumentet att vegetation kan vara en bra strategi för att modifiera platser i städer som ofta har dessa problembilder. Stadsmiljöns vanligen förekommande låga markfukt underbygger vidare argument till varför permeabla markytor är en bra strategi i städer, både för att förhöja den evaporativa förmågan men även för att öka andelen tillgängligt vatten i marken som möjliggör för vegetationen att transpirera effektivt (Watkins, Palmer & Kolokotroni, 2007).

3.2.3 Vegetation och vind

Förekomsten av vind kan både minska och öka komforten i staden beroende på dess hastighet eller vilken lufttemperatur som råder, av den anledningen är det intressant att belysa hur vegetation kan komma att påverka vindflödet i stadsrummet. Vid kalla temperaturer kommer vindens närvaro skapa ännu lägre komfort och i dessa situationer kan vegetation användas för att skapa vindskydd. Glaumann & Westerberg (1988) lyfter här läplanteringar som effektiva för att öka komforten. Vid höga temperaturer däremot, kan vegetation minska och helt eliminera vindflödet vilket istället kan ge negativa effekter. Konijnendijk et al. (2005) problematiserar detta faktum och menar att träd av den anledningen måste planteras strategiskt, så att ventilationen är god trots trädets närvaro. Trädets närvaro är viktigt för skapandet av skugga och således är det av stor vikt att hitta en lösning som möjliggör både skugga och vind. I dessa fall menar Giovanni (1991) att solitärträd med hög stam kan vara att föredra, då dessa möjliggör vind vid marknivå samtidigt som det kan ge skugga. Lägre buskage eller växtlighet är däremot mindre önskvärd på platser som blir väldigt varma, då dessa bromsar upp vinden vid marknivån. Eftersom Sverige har ett skiftande klimat över året är det av stor vikt att beakta båda aspekterna och se till den specifika platsens förutsättningar och problembild när dess innehåll planeras.

3.3 Termisk komfort

Termisk komfort kan definieras som sinnets tillstånd när det är tillfredsställt med den termiska miljön (Wong & Chen, 2009). Det är energiutbytet mellan människans kropp och dess omgivning som fastställer den termiska komforten och detta kan variera beroende på personliga och meteorologiska parametrar. De personliga parametrarna bestäms av kön, vikt, klädsel eller aktivitet och de meteorologiska parametrarna av temperatur-, strålnings-, vind- och fuktighetsförhållanden (Thorsson, 2012). Människans perception av klimatet kan därmed skilja sig från den uppmätta lufttemperaturen och det räcker således inte att enbart mäta lufttemperatur

för att avgöra om klimatet är behagligt eller ej (Höppe, 1999). Exempelvis menar Glaumann och Nord (1993) att temperaturen kan upplevas 15°C varmare i full sol än om personen vistas i skugga. Författarna (ibid.) påpekar även att närvaron av vind och dess variation i vindstyrka starkt påverkar hur människan upplever temperaturen. *Physiological Equivalent Temperature* (PET) och *Wind-Chill Index* (WCI) är två exempel på metoder som tagits fram för att kunna beräkna människans upplevelse av temperaturen (Mayer & Höppe, 1987; Höppe, 1999).

Höppe (1999) förklarar PET som en modell över människans värmebalans vid olika kombinationer av personliga- och meteorologiska parametrar. Förekomst av vind på vintern kan skapa PET-värden så låga som 15°C lägre än den uppmätta lufttemperaturen och PET-värden på sommaren kan ligga så högt som 20°C högre än den uppmätta lufttemperaturen (Höppe, 1999). Modellen introducerades av Höppe och Mayer år 1987 och är baserad på en tidigare modell som heter *Munich Energy-balance Model for Individuals* (MEMI). Tanken bakom PET är att det ska gå att uppskatta upplevelsen av utomhusklimatet som om att det vore ett inomhusklimat (Mayer & Höppe, 1987). Detta innebär att om PET-värdet för ett utomhusklimat är 32°C, så går det att likna med det termiska tillstånd som en människa upplever när hon sitter inomhus i ett rum med en lufttemperatur på 32°C. PET-värden kan vara användbara i väderleksrapporter, eftersom det är lättare för varje individ att sätta sig in i hur ett inomhusklimat vid en viss temperatur uppfattas framför vad en viss lufttemperatur innebär i komfort (eftersom den inte tar hänsyn till andra meteorologiska parametrar som också påverkar upplevelsen av klimatet). Med PET-värden blir det lättare för varje individ att göra sysselsättnings- eller klädval för dagen och på så vis lättare kunna anpassa sin egen komfort.

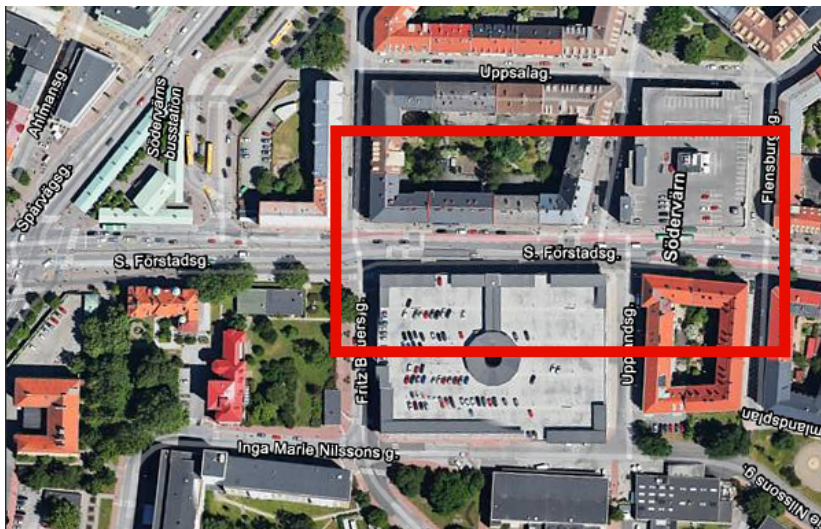
Vinden påverkar i högsta grad människans termiska komfort. Brown och Gillespie (1995) beskriver hur värme lämnar människans kropp till omgivande luft genom konvektion och hur huden kyls ner, när huden är i kontakt med en vind som har lägre temperatur (vilket oftast är fallet för utomhusklimat). Vidare beskriver författarna (ibid.) att vindens effekt på den termiska komforten påverkas av faktorer som vindhastighet, temperaturskillnaden mellan vind och människa samt hur isolerande individens kläder är. Genom dessa faktorer går det att dra slutsatser kring hur ökade vindhastigheter eller ökade temperaturskillnader mellan vind och människa leder till ökad kylningseffekt, men även hur individens klädsel påverkar om vinden upplevs som nedkylande eller ej. För att synliggöra hur vindens hastighet kan påverka den upplevda komforten har tabeller som wind-chill index (WCI) tagits fram. Se tabell 2 för hur vi människor upplever lufttemperaturen i kombination med olika vindhastigheter. Observera att denna tabell är skapad för lägre lufttemperaturer än denna uppsats avser, men den kan ändå ge en god förståelse om hur vinden påverkar människans perception av klimatet. Det är främst vid lägre temperaturer som vinden ger högre avkylning än vad termometern visar (SMHI, 2015b).

Tabell 2. Hur människan upplever temperaturen vid olika vindhastigheter mot bar hud. Ju kallare lufttemperaturen är, desto mer avkylande effekt får vinden (SMHI, 2015b)

	10	6	0	-6	-10	-16	-26	-30	-36
2 m/s	9	5	-2	-9	-14	-21	-33	-37	-44
6 m/s	7	2	-5	-13	-18	-26	-38	-44	-51
10 m/s	6	1	-7	-15	-20	-28	-41	-47	-55
14 m/s	6	0	-8	-16	-22	-30	-44	-49	-57
18 m/s	5	-1	-9	-17	-23	-31	-45	-51	-59

4. Klimatstudie i ENVI-met

Studien har som avsikt att studera vilka eventuella effekter en ökad kvantitet av stadsträd kan ha på en gatukanjon i Malmö. Detta genom att studera de eventuella skillnader som uppstår i en kanjon när den har träd i sammanhängande växtbäddar, respektive inte har träd eller växtbäddar. Testerna utförs i dataprogrammet ENVI-met genom simuleringar som sträcker sig över en 24-timmars period, från midnatt till midnatt. Utdata kommer därefter samlas in kl. 14:00 och 16:00 för dagen samt 18:00, 20:00, 22:00 och 01:00 för kvällen. Testerna kommer utföras på Södra Förstadsgatan i Malmö, delen mellan Dalaplan och Södervärn. Hela studieområdet är ca. 250 m x 400 m stort men i analysen kommer främsta fokus vara på kanjonen mellan Flensburgsgatan och Fritz Bauersgatan, även om hänsyn kommer tas till området som helhet. Se figur 6 för karta över studieområdet. Testerna utgår ifrån ett framtidsperspektiv och kommer att utföras på en sommardag i augusti år 2100 och baseras på en förväntad ökning av medeltemperaturen med 4°C för Skåne län (SMHI, 2016b). Tester kommer även utföras på en framtida rekordvarm dag för att studera hur gatuklimatet påverkas under en värmebölja när temperaturen stiger ytterligare.



Figur 6. Karta över studieområdet längs med Södra Förstadsgatan i Malmö. Fokusområdet är beläget mellan Fritz Bauersgatan och Flensburgsgatan (markerad med en röd rektangel). Vyn är roterad ca. 90° åt väst. Dalaplan ligger utanför bild till höger (söder) och Södervärn till vänster (norr) (Google Maps, 2016).

4.1 Klimatdata Malmö

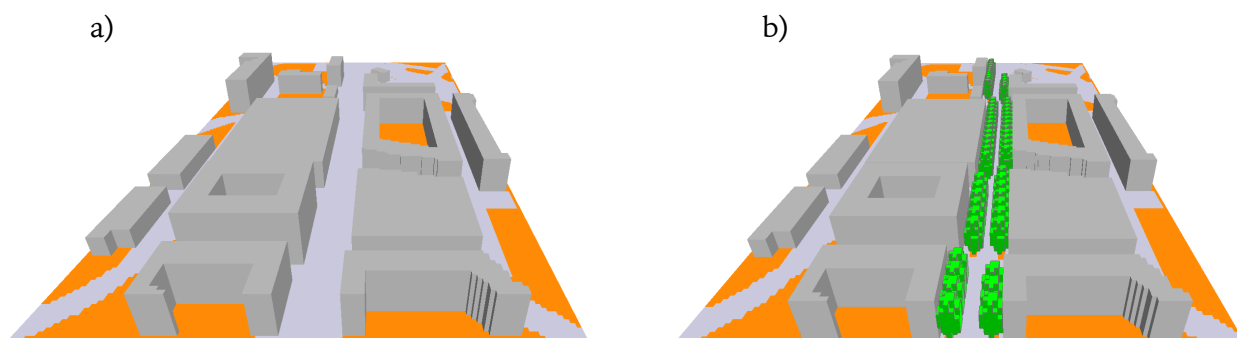
I samtliga simuleringar är vinden 270° ren väst med en hastighet på 4.2 m/s. Dessa värden är baserade på uppmätt data från olika väderstationer i Malmö och inhämtade från programmet METEONORM. Luftfuktigheten ligger på 58 % i samtliga fall och är uträknad med hjälp av ett psykrometriskt diagram, som kan användas för att se hur luftfuktigheten sjunker i takt med att lufttemperaturen höjs. Idag ligger luftfuktigheten i Malmö på 74 % (METEONORM) men med en temperaturökning på 4°C kan den komma att sänkas till 58 %. Samtliga fall är testade under molnfria förhållanden eftersom det är mest relevant för de varma förhållanden som studien avser studera.

Idag har Malmö en dygnsmedeltemperatur på 17,6°C i augusti (METEONORM, 2016). Med en allmän temperaturökning på 4°C kan dygnsmedeltemperaturen för augusti stiga till 21,6°C (SMHI, 2016b). Den rekordvarma dagen baseras på IWEC-data för den varmaste veckan på året som uppmättes i augusti då dygnsmedeltemperaturen var 20,1°C (EnergyPlus, 2016). Med den allmänna temperaturhöjningen på 4°C går det därmed att anta att en framtida värmebölja kan ha dygnsmedeltemperaturer på 24,1°C. ENVI-met tar hänsyn till att meteorologiska parametrar

varierar under dagen, från morgon till kväll. Nämnda värden är därmed inte konstanta under hela dygnet. Dock kommer vindhastigheten vara densamma under hela simuleringsperioden.

4.2 Gatukanjonens förutsättningar

Studieområdet består till stor del av bostadshus (4-6 våningar) med verksamheter i bottenplan, men även av parkeringshus och lägre bebyggelse. Byggnadernas höjder är uträknade efter antagandet att varje våning är 3 m hög. I dagsläget innehåller kanjonen nästintill uteslutande hårdgjorda material med några fåtal träd som står i begränsade växtbäddar. För att tydligare kunna studera vilka eventuella effekter en ökad andel stadsträd och permeabla markytor har på klimatet, kommer de få träd som står här idag plockas bort i simuleringen. Två olika situationer kommer därmed att testas: kanjonen *utan* träd och kanjonen *med* träd som står i sammanhängande växtbäddar. I situationen med träd kommer 60 st träd att placeras in på båda sidorna av körfältet. Växtbäddarna i testet har ingen undervegetation utan består av bar jord med en markfukt på 60%, vilket kan anses vara en optimal markfukt för träd. Jordarten klassificeras som en loam, d.v.s. en jord som består av 50 % sand, 40 % silt och 10 % lera (Eriksson, Dahlin, Nilsson & Simonsson, 2011). Träden i studien är av arten *Acer campestre* (Naverlönn) som enligt ENVI-mets värden är 12m högt med en kronbredd på 9 m. Samtliga hårdgjorda ytor i studien består av ett material som i ENVI-met heter pavement dirty/used med en albedo på 0,4. De fyra centrala byggnaderna har tilldelats specifika fasadmateriell, betong och tegel. Resterande byggnader har default-inställningarna som ENVI-met har på byggnadsfasader. Se figur 7 för gatukanjonens utformning utan/med träd och sammanhängande växtbäddar.



Figur 7. Gatukanjonens utformning i ENVI-met. Markens grå ytor visar placeringen av hårdgjorda ytor och de bruna ytorna visar var jord eller vegetation förekommer inom studieområdet. a) 3D-vy över kanjonens utformning utan träd. b) 3D-vy över kanjonens utformning med träd. Illustration: Författaren, 2016.

Utdata kommer att hämtas från olika punkter som är utplacerade med jämna mellanrum på 2 m inom hela studieområdet. Samtliga diagram utgår ifrån data som samlats in 1 meter ovan plan, bortsett från yttemperaturen. På detta sätt kan luft- och yttemperatur, vindhastighet, relativ luftfuktighet, specifik luftfuktighet och termisk komfort inom gatukanjonen studeras. Sammanlagt kommer fyra olika situationer att testas (tabell 2).

Tabell 2. De fyra olika situationerna som kommer testas på gatukanjonen

SITUATION 1A	SITUATION 1B	SITUATION 2A	SITUATION 2B
Ökad medeltemperatur	Ökad medeltemperatur	Värmebölja	Värmebölja
Gatukanjon <u>med</u> träd	Gatukanjon <u>utan</u> träd	Gatukanjon <u>med</u> träd	Gatukanjon <u>utan</u> träd

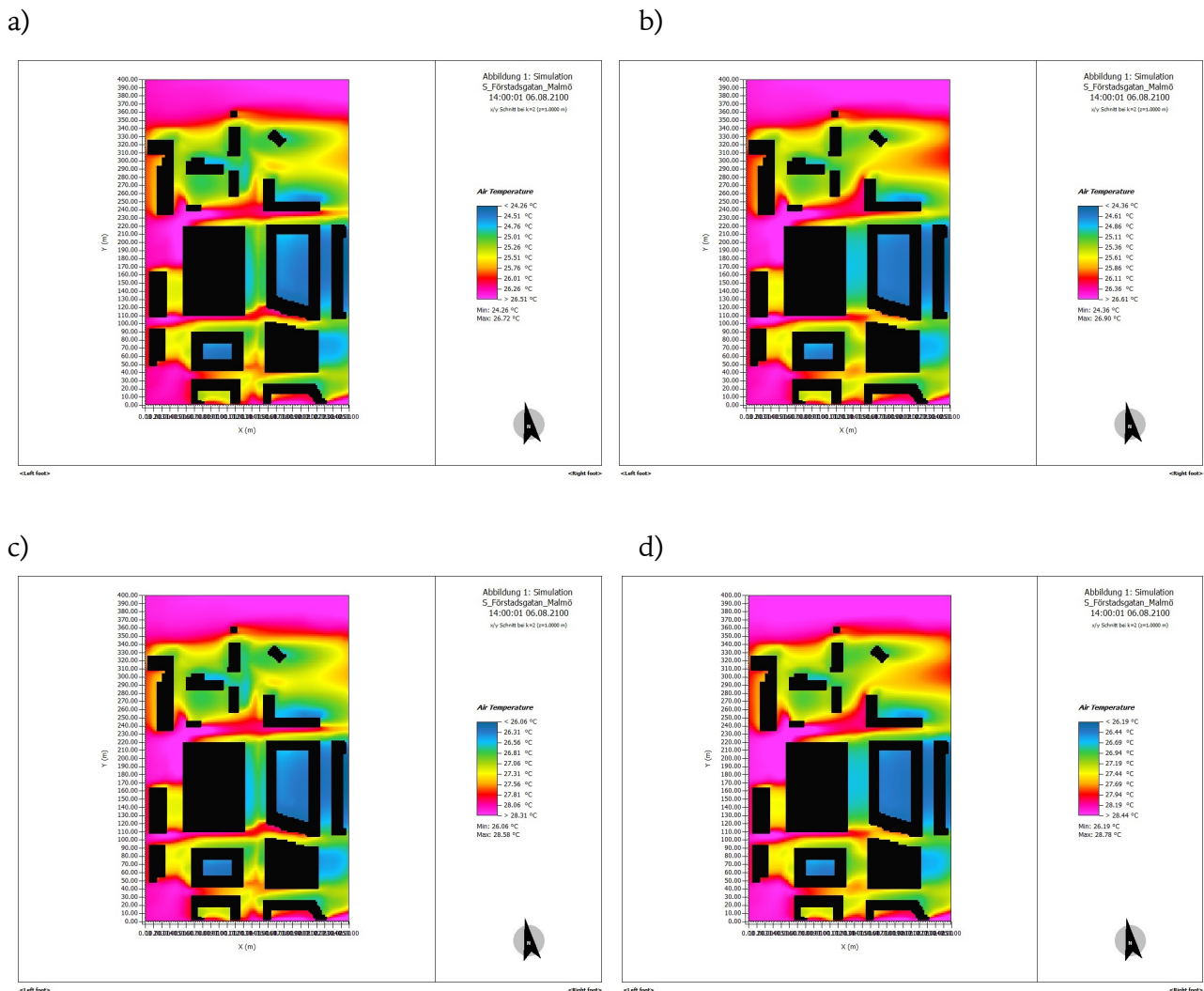
5. Resultat

Samtliga figurer som visas i detta kapitel finns i större format i bilaga 1.

5.1 Lufttemperatur

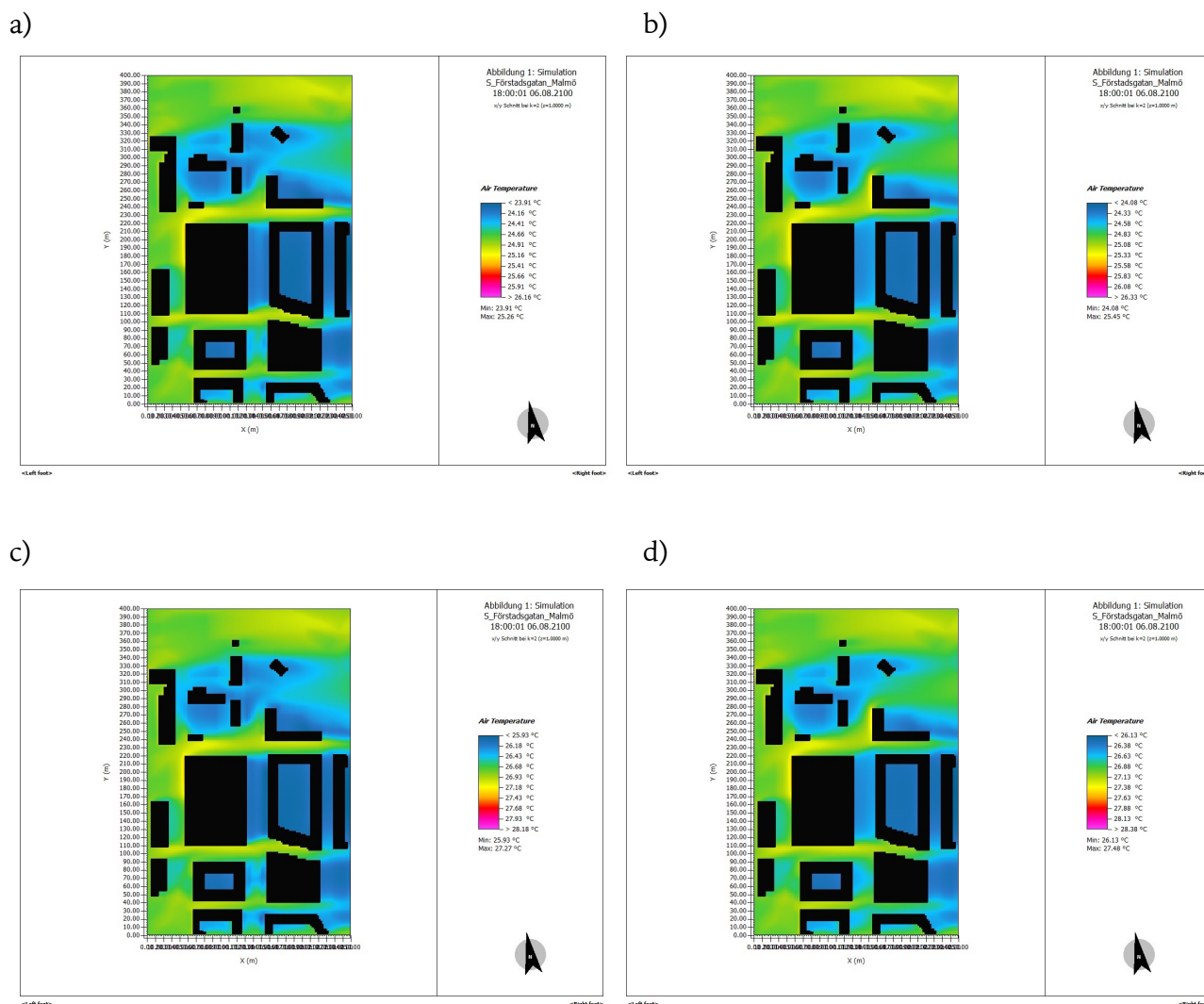
Vid 16:00 kommer lufttemperaturen vara som högst i gatukanjonen med 26,5°C vid *ökad medeltemperatur* och 28,5°C vid *värmeböljan*. Det är därmed inte stor temperaturskillnad inom gatukanjonen mellan de två olika temperaturscenerierna som testas.

Av diagrammen framgår inga stora skillnader i lufttemperatur mellan fallen under dagtid, varken för *ökad medeltemperatur* eller *värmeböljan* (figur 8). Dock uppstår vissa variationer som kan beläggas vidare. Vid 14:00 är lufttemperaturen upp till 0,15°C högre i den norra kanjonen av fokusområdet i fallen med träd (situation 1a & 2a). Skillnaderna är så små att de nästintill är försumbara. Temperaturskillnaden kan ha orsakats av trädskronornas närvaro då de kan bromsa upp vindflödet, vilket leder till försämrad ventilation inom gatukanjonen. Detta påstående går i linje med vad diagrammen för vindhastigheten visar (se figur 15), då en lägre vindhastighet på 0,5 m/s uppstår i den norra kanjonen som har träd. Vid 16:00 utjämnas lufttemperaturen fallen emellan och det är svårt att se några tydliga skillnader.



Figur 8. Lufttemperaturen inom studieområdet längs med Södra Förstadsgatan i Malmö vid 14:00. a). 1a - Ökad medeltemperatur med träd. b) 1b - Ökad medeltemperatur utan träd. c) 2a - Värmeböljan med träd d) 2b - Värmeböljan utan träd. Illustration: Författaren, 2016

Vid 18:00 sker ett skifte och diagrammen visar att lufttemperaturen i den norra delen av fokusområdet blir upp mot 0,45°C lägre i fallet med träd än i fallet utan träd, både för *ökad medeltemperatur* och *värmeböljan*. Detta framgår av den mörkare blå färgen i den norra delen av fokusområdet, se figur 9 för jämförelse. I de södra delarna går det även att se att den blå färgen blir tydlig där träden är placerade, vilket kan tyda på att kyligare luft uppstår lokalt på kvällen där det finns träd och växtbäddar.



Figur 9. Lufttemperaturen inom studieområdet längs med Södra Förstadsgatan i Malmö vid 18:00. a). 1a - Ökad medeltemperatur med träd. b) 1b - Ökad medeltemperatur utan träd. c) 2a - Värmeböljan med träd d) 2b - Värmeböljan utan träd. Illustration: Författaren, 2016.

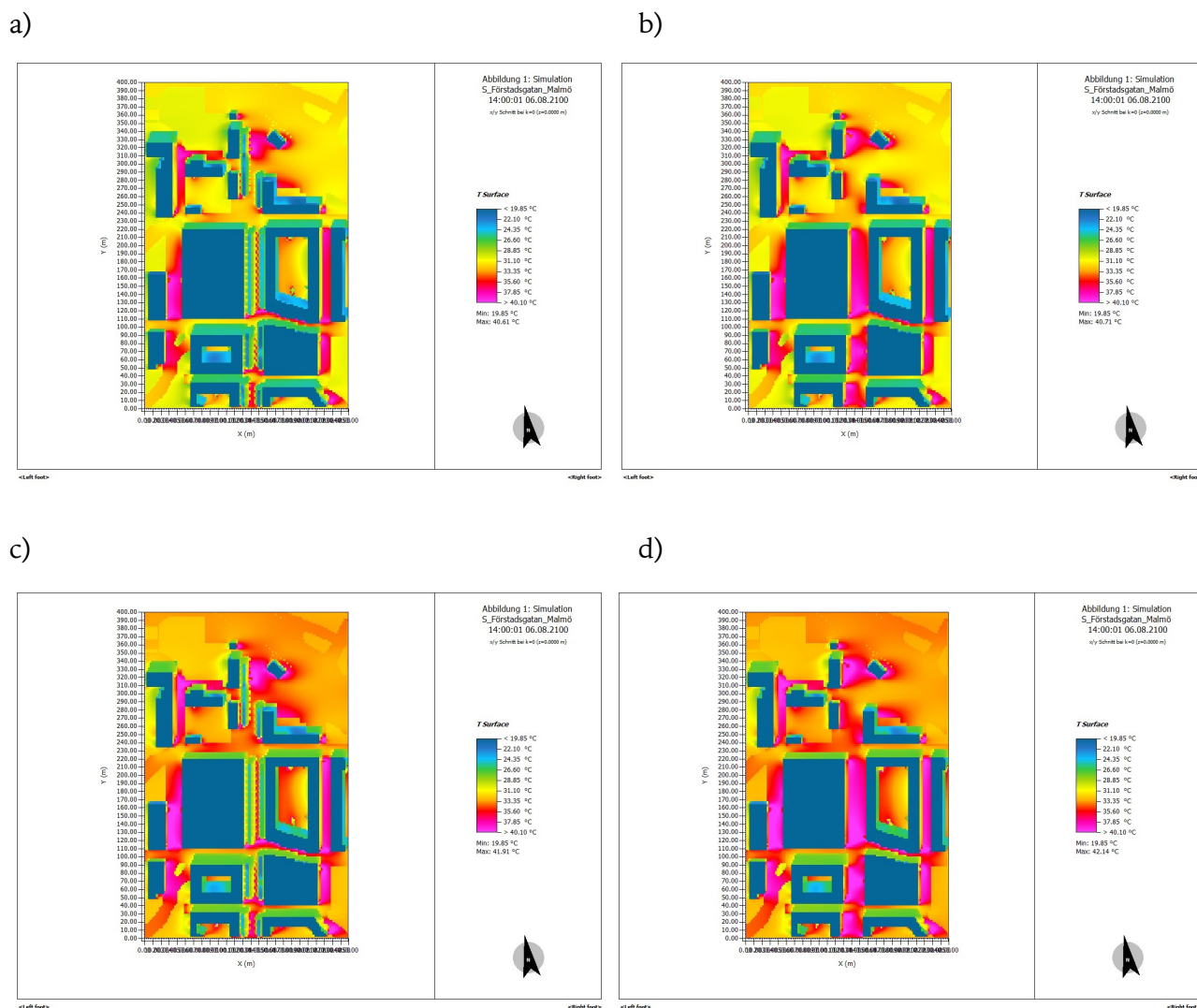
Diagrammen visar att skillnaden i lufttemperatur ökar närmare midnatt. Mellan 18:00 - 01:00 har gatukanjonen med träd generellt 0.2 - 0.5°C lägre lufttemperatur inom gatukanjonen än fallet utan träd, beroende var i kanjonen man jämför. Från 18:00 - 22:00 skiljer det upp mot 0,42°C och 01:00 uppstår störst skillnad på 0,5°C. Detta gäller både för scenariot med *ökad medeltemperatur* och *värmeböljan*.

5.2 Ytemperatur

Ytemperaturen är betydligt lägre under träden och i skuggan av byggnaderna än i full sol. De skuggade växtbäddarna håller lägre ytemperatur än det skuggade hårdgjorda materialet vid både

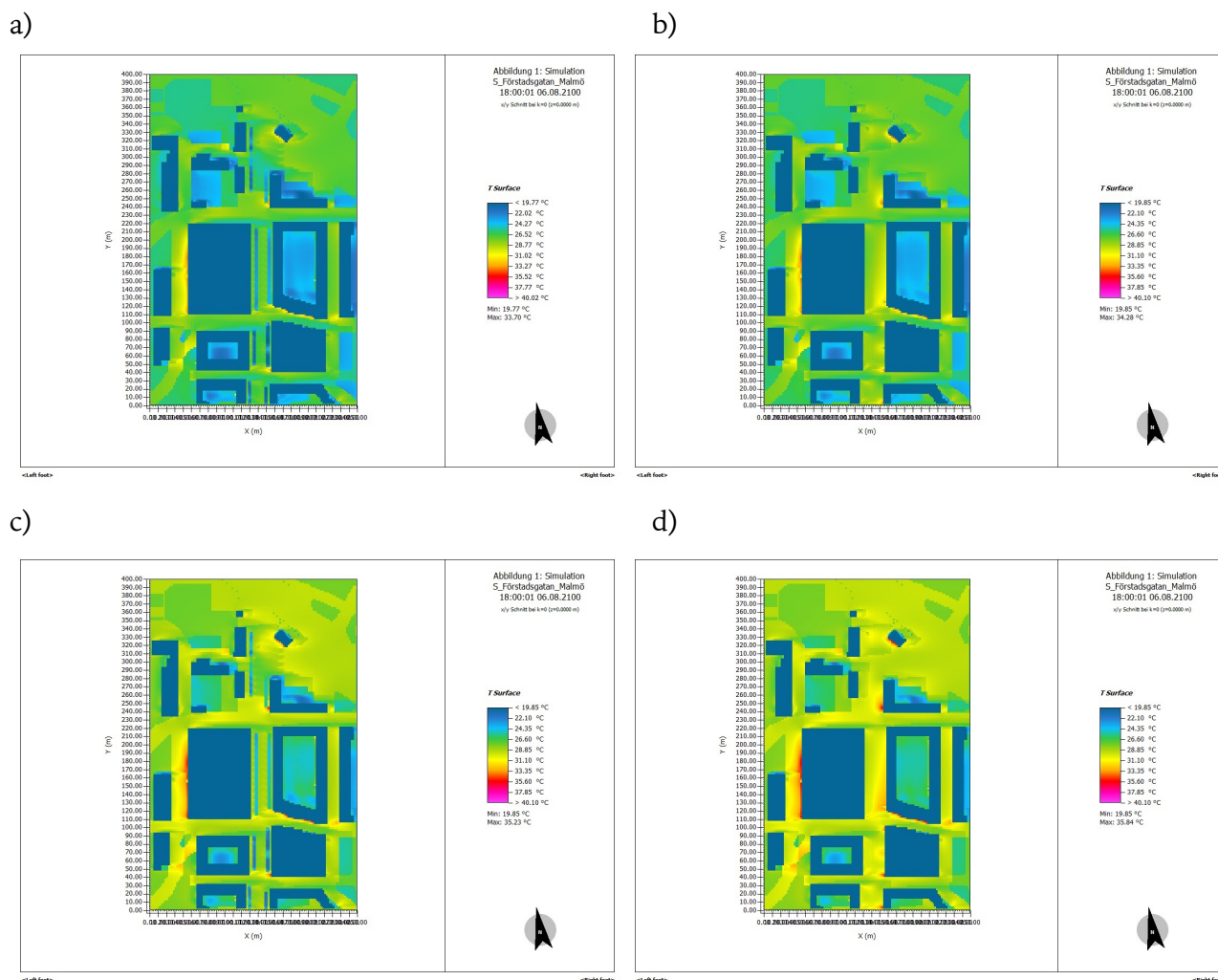
ökad medeltemperatur och värmeböljan. Utmärkande är att växtbäddarna håller lägre yttemperatur än omgivande lufttemperatur vid samtliga tidpunkter som data insamlats (14:00 - 01:00). Vid 14:00 och 16:00 har växtbäddarna i ökad medeltemperatur en yttemperatur på 20 - 24°C när lufttemperaturen är 25 - 26°C och växtbäddarna i värmeböljan en yttemperatur på 22 - 26°C när lufttemperaturen är 26 - 28°C. Därmed har växtbäddarna upp mot 6°C lägre yttemperatur än omgivande lufttemperatur. Se figur 10 för jämförelse. Det är enbart diagram från 14:00 som presenteras nedan då skillnaderna som uppstår vid 16:00 är snarlika.

Vid 14:00 och 16:00 har det skuggade gatumaterialet en yttemperatur på 26,5 - 31°C när lufttemperaturen är 25 - 26°C vid ökad medeltemperatur och 26 - 28°C vid värmeböljan inom gatan kanjonen. I fallen utan träd uppnår gatumaterialet en yttemperatur på 37 - 40°C. Detta visar att yttemperaturen under dagtid kan sänkas med 13,5°C genom att skuggas av träd.



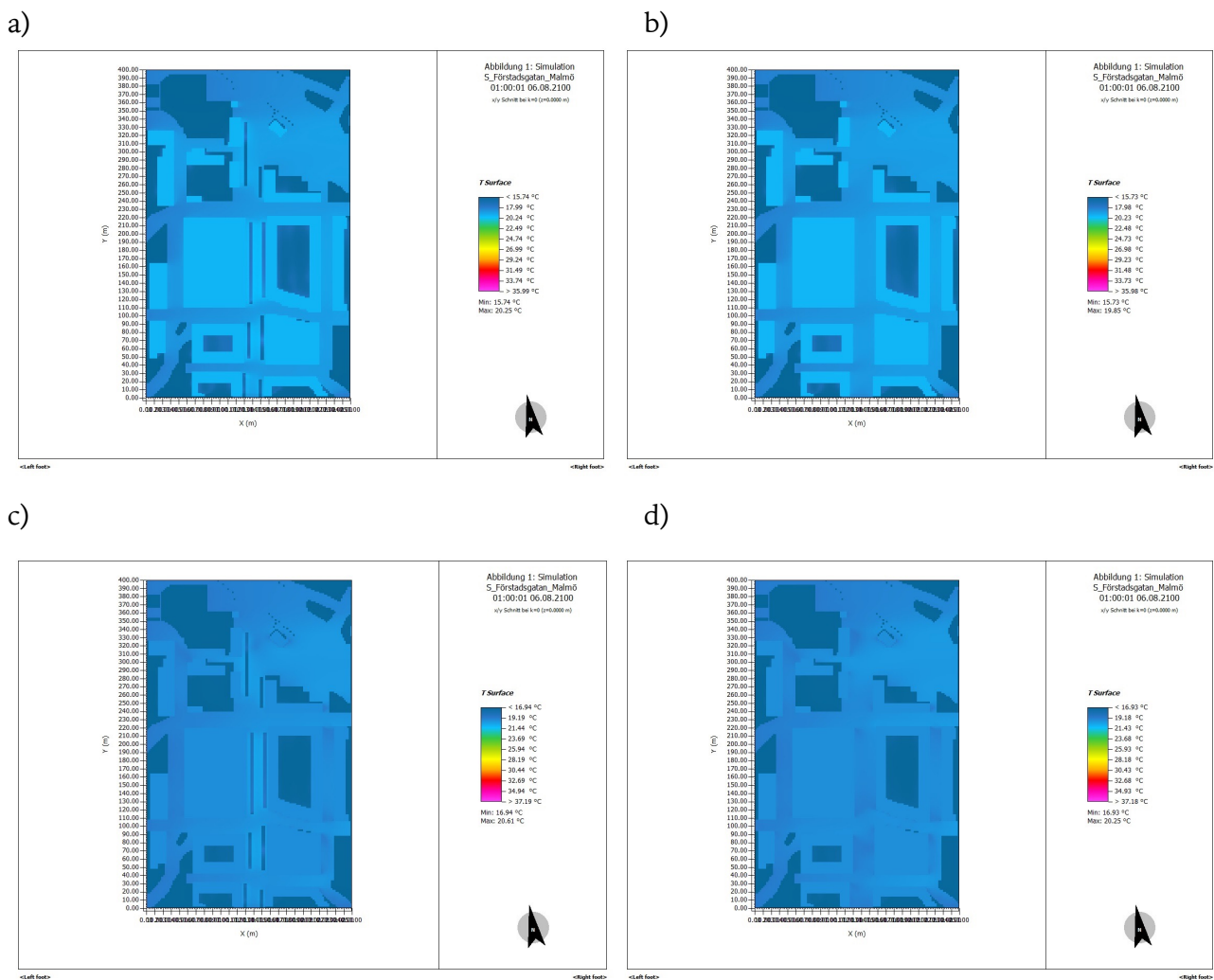
Figur 10. Yttemperaturen inom studieområdet längs med Södra Förstadsgatan i Malmö vid 14:00. a) 1a - Ökad medeltemperatur med träd. b) 1b - Ökad medeltemperatur utan träd. c) 2a - Värmebölja med träd. d) 2b - Värmebölja utan träd. Illustration: Författaren, 2016.

Vid 18:00 går det att se en utjämning i ytemperaturerna. Skillnaden i ytemperatur är inte längre lika markant i fallen med och utan träd. Ytemperaturen skiljer nu bara 2°C i *ökad medeltemperatur* och 5°C i *värmebölja*. Ytemperaturen i fallet utan träd har därmed sjunkit 12°C i *ökad medeltemperatur* och 9°C i *värmebölja* mellan 14:00 - 18:00. I fallet med träd har ytemperaturen knappt rört sig mellan 14:00 - 18:00 (< 2°C). Ytemperaturen är därmed mer stabil i kanjonen som skuggas av träd medan större variationer i ytemperatur uppstår i kanjonen utan träd. Se figur 11 för jämförelse.



Figur 11. Ytemperaturen inom studieområdet längs med Södra Förstadsgatan i Malmö vid 18:00. a) 1a - Ökad medeltemperatur med träd. b) 1b - Ökad medeltemperatur utan träd. c) 2a - Värmebölja med träd. d) 2b - Värmebölja utan träd. Illustration: Författaren, 2016.

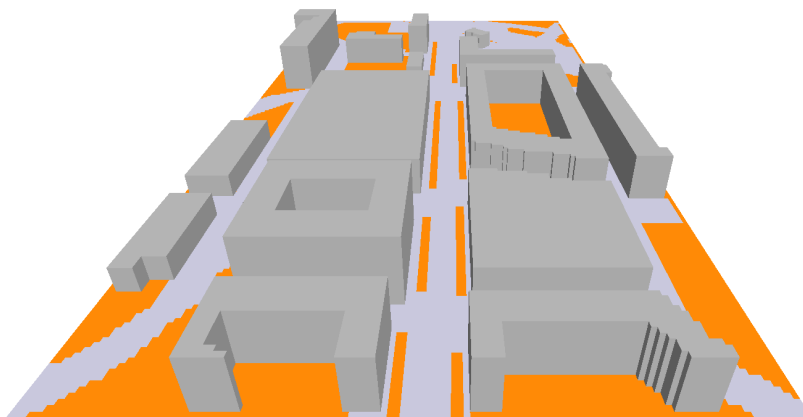
Vid 01:00 sker ett skifte och nu får fallen med träd högre ytemperaturer än fallen utan träd. Gatumaterialet får en skillnad i ytemperatur på 2°C för både *ökad medeltemperatur* och *värmebölja*. Detta framgår av den ljusare blå färgen som uppstår inom kanjonen i fallet med träd. Se figur 12 för jämförelse.



Figur 12. Yttertemperaturen inom studieområdet längs med Södra Förstadsgatan i Malmö vid 01:00. a) 1a - Ökad medeltemperatur med träd. b) 1b - Ökad medeltemperatur utan träd. c) 2a - Värmebölja med träd. d) 2b - Värmebölja utan träd. Illustration: Författaren, 2016.

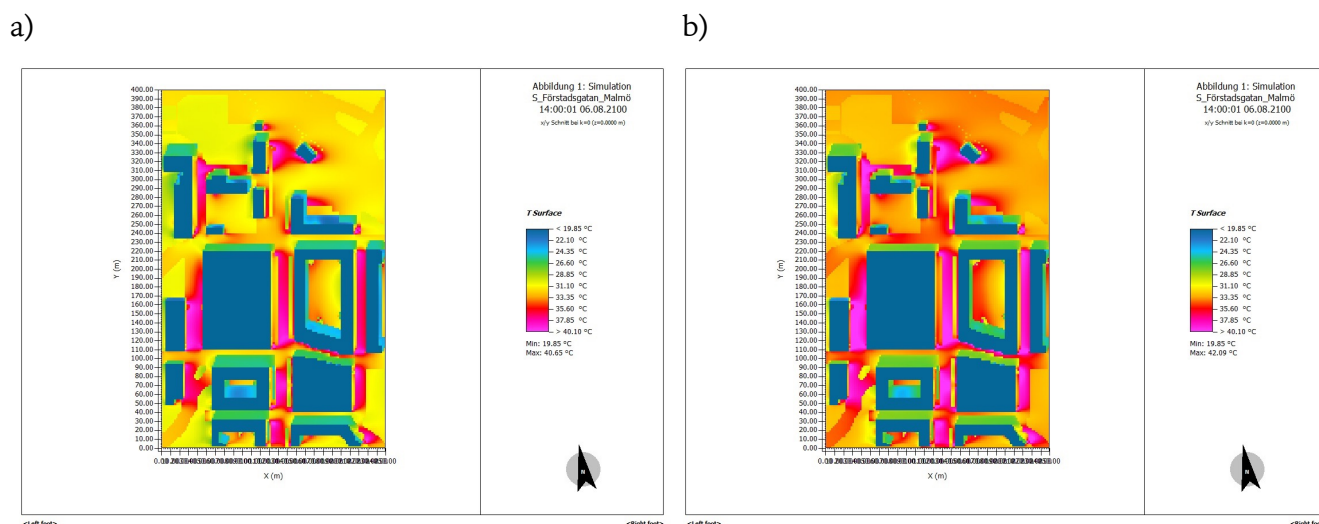
5.2.1 Yttertemperatur växtbäddar utan träd

För att studera hur växtbäddarnas yttertemperatur påverkas när de inte skuggas av träd, kommer ytterligare tester göras där samtliga träd avlägsnas från modellen (se figur 13).



Figur 13. Gatukanjonens utformning i ENVI-met. Träden har avlägsnats och växtbäddarna syns nu som brandgula ränder inom gatukanjonen. Illustration: Författaren, 2016.

Växtbäddarna syns tydligt i diagrammen då de får lägre ytemperaturer än omgivande hårdgjort gatumaterial (se figur 14). När växtbäddarna utsätts för full sol uppnår de högre ytemperaturer än de fick när de skuggades av träd. Växtbäddarna har inte längre en lägre ytemperatur än omgivande lufttemperatur. Vid 14:00 har växtbäddarna en ytemperatur på 28 - 33°C när lufttemperaturen är 25 - 26°C för *ökad medeltemperatur* respektive 27 - 28°C för *värmeböljan*. Detta är ungefär samma ytemperatur som gatumaterialet fick när de skuggades av träd (30 - 31°C). Resultaten kan därmed tolkas som att bar jord som är exponerad för full sol, får liknande ytemperatur som gatumaterialet när det skuggas av träd. Vidare går det att konstatera att naturliga ytor får markant lägre ytemperatur än artificiella ytor när de är exponerade för sol, en skillnad som överstiger 10°C.

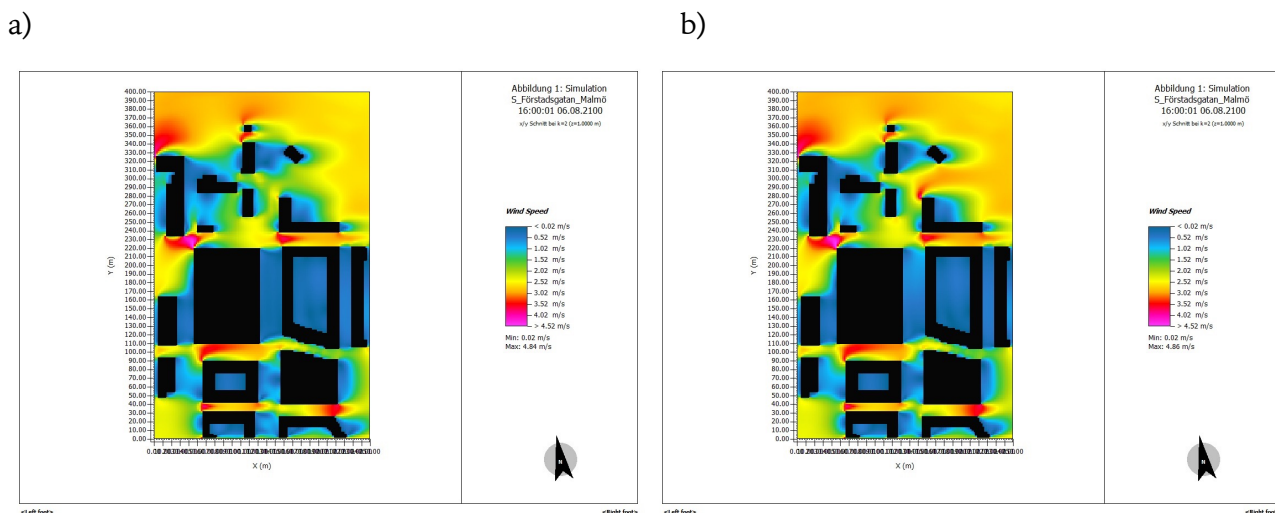


Figur 14. Ytemperaturen inom studieområdet längs med Södra Förstadsgatan i Malmö när växtbäddarna är fullt exponerade för sol vid 14:00. a) Ökad medeltemperatur b) Värmebölja. Illustratör: Författaren, 2016.

5.3 Vindhastighet

Att vinden är västlig syns tydligt på diagrammen då gatorna som vetter väst/öst har god ventilation i jämförelse med gatorna som vetter nord/syd. Södra Förstadsgatans orientering gör att byggnadernas väggar förhindrar och stoppar upp vinden, vilket betyder att kanjonens förutsättningar till god ventilation är dålig oberoende om där står träd eller inte. Vindhastigheten är relativt låg inom gatukanjonen i både fallen med och utan träd. Dock går det att se vissa skillnader fallen emellan som kan diskuteras vidare.

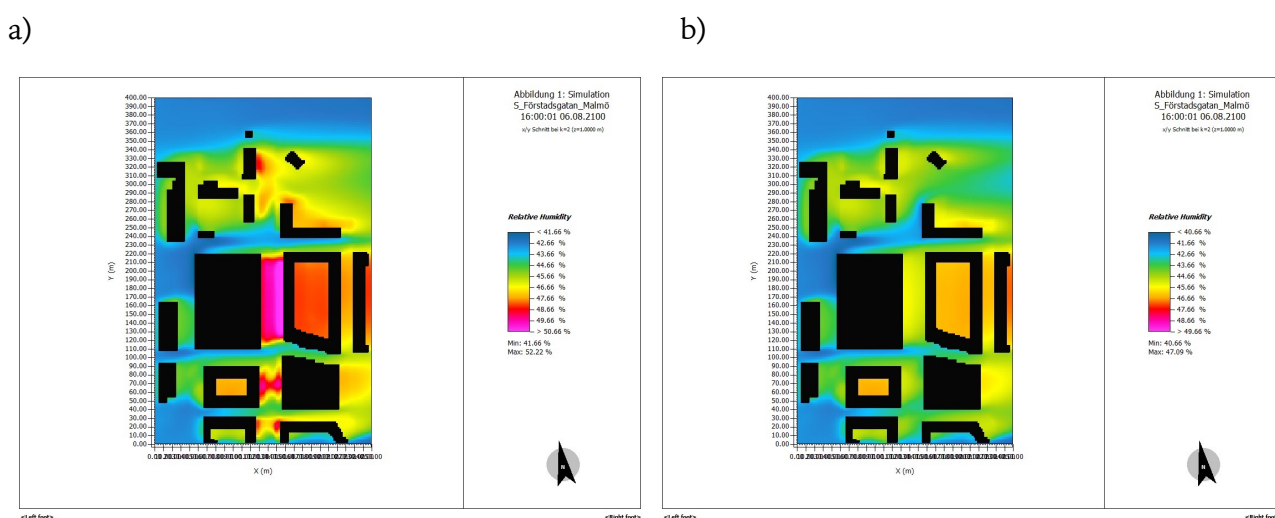
I den norra delen av fokusområdet är vindhastigheten lägre i fallen med träd än för fallen utan träd, med 0,5 m/s. I fokusområdets södra del ser det tvärtom ut att vara något bättre ventilation i fallen med träd, än i fallen utan. Det förekommer en högre andel grön/gul färg i fallen med träd vilket indikerar att ventilationen är något högre. Grön/gul färg representerar en vindhastighet på 1,02 m/s. Se figur 15 för jämförelse. Då vindhastigheten är konstant under samtliga tidpunkter och densamma mellan *ökad medeltemperatur* och *värmeböljan* kommer enbart data från 16:00 presenteras nedan.



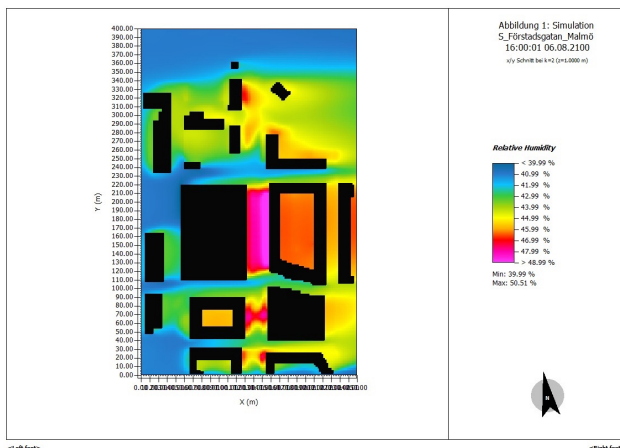
Figur 15. Vindhastigheten inom studieområdet längs med Södra Förstadsgratan i Malmö. a) Gatukanjonen med träd. b) Gatukanjonen utan träd. Illustration: Författaren, 2016.

5.4 Relativ luftfuktighet

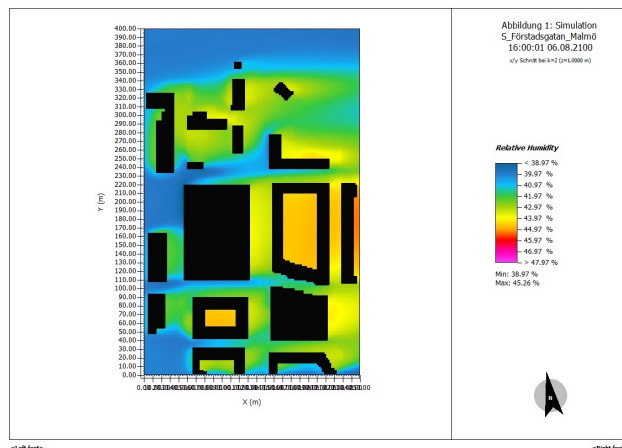
Den relativa luftfuktigheten anger hur stor andel vattenånga som finns i luften vid en aktuell temperatur i förhållande till den maximala mängden vattenånga som kan uppnås vid samma temperatur. Det finns en stark koppling mellan den relativa luftfuktigheten och lufttemperaturen, den är generellt lägre vid höga temperaturer för att öka vid lägre temperaturer. Den relativa luftfuktigheten anges i procent där 100 % beskriver att mängden vattenånga är maximal vid rådande temperatur (Wern, 2013). Det är tydligt att den relativa luftfuktigheten blir större lokalt där det finns träd och växtbäddar. Störst är den relativa luftfuktigheten vid 01.00 med över 74 % och 76 % för *ökad medeltemperatur* respektive *värmeböljan*. De största skillnaderna mellan fallen syns i fokusområdets södra del. Den relativa luftfuktigheten stiger alltså med tiden och blir som störst under natttid. Den relativa luftfuktigheten varierar generellt 3 - 7 % mellan fallen med träd och utan träd. Nedan presenteras den relativa luftfuktigheten vid 16:00 och 01:00 för att ge en jämförande bild över dess dygnsvariation (se figur 16 & 17).



c)

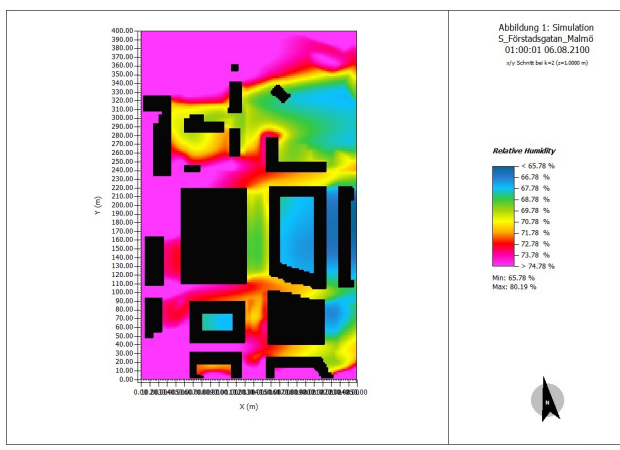


d)

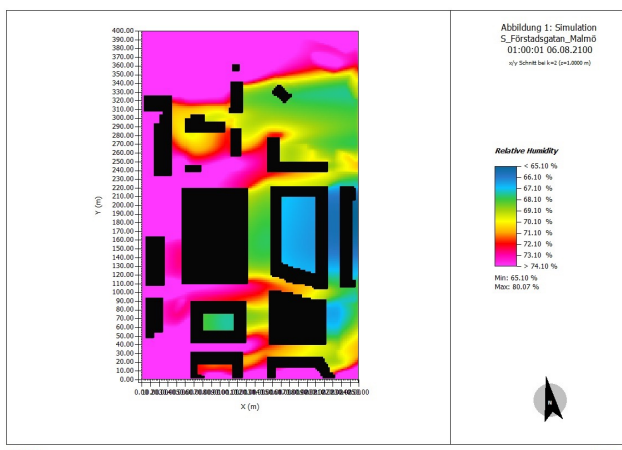


Figur 16. Den relativa luftfuktigheten inom studieområdet längs med Södra Förstadsgatan i Malmö vid 16:00
a) 1a - Ökad medeltemperatur med träd. b) 1b - Ökad medeltemperatur utan träd. c) 2a - Värmeböljan med träd. d) 2b - Värmeböljan utan träd. Illustration: Författaren, 2016.

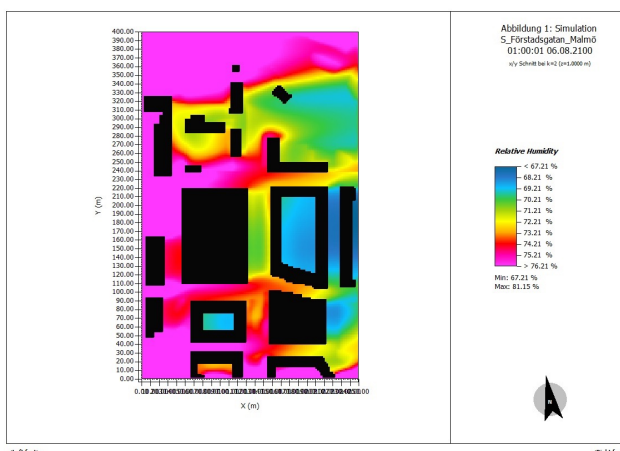
a)



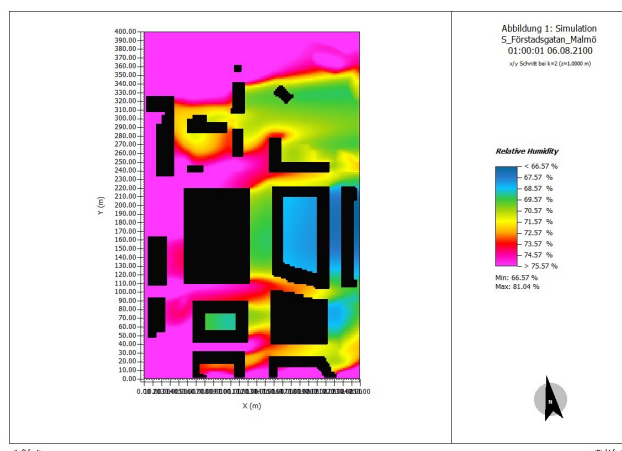
b)



c)

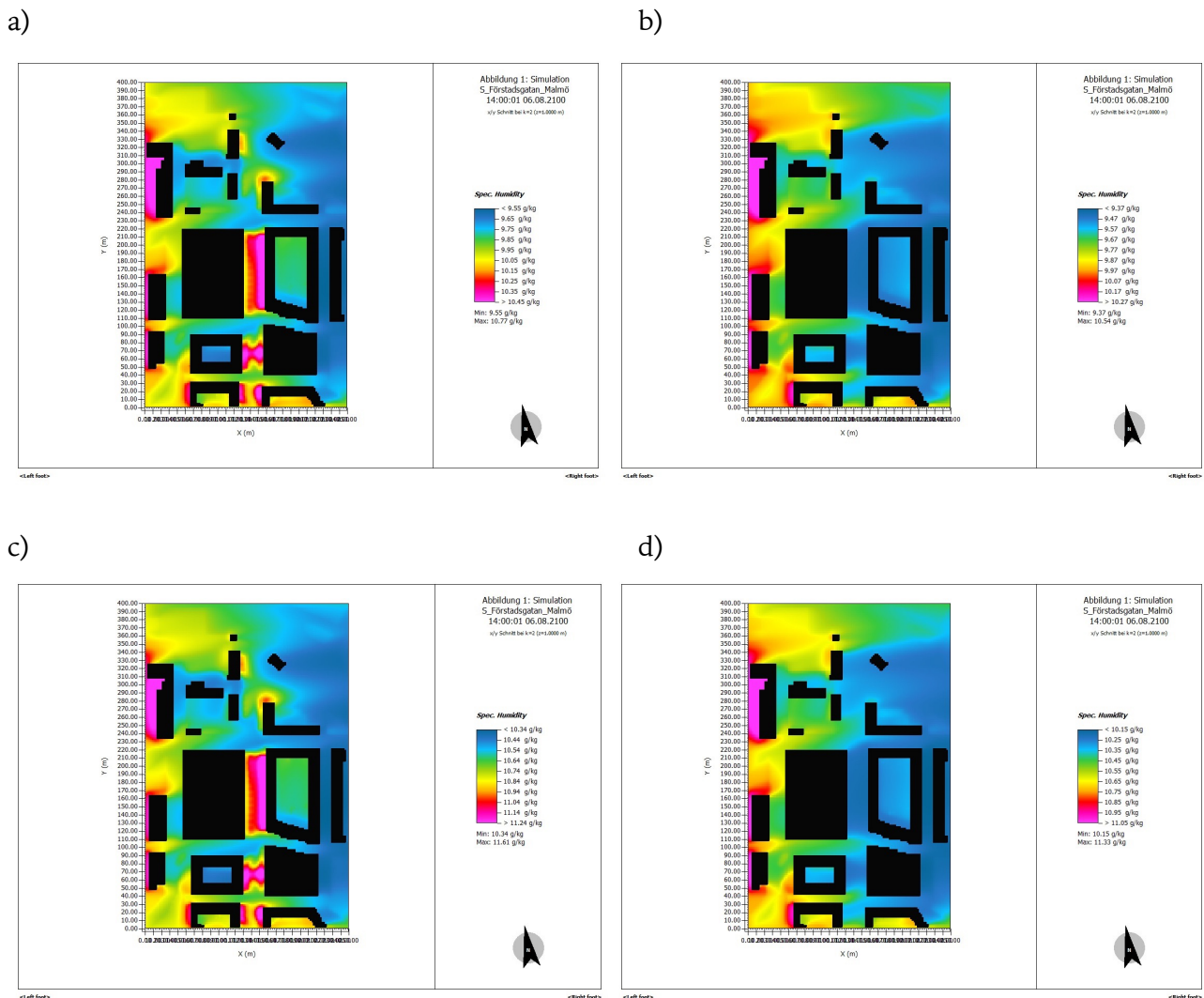


d)

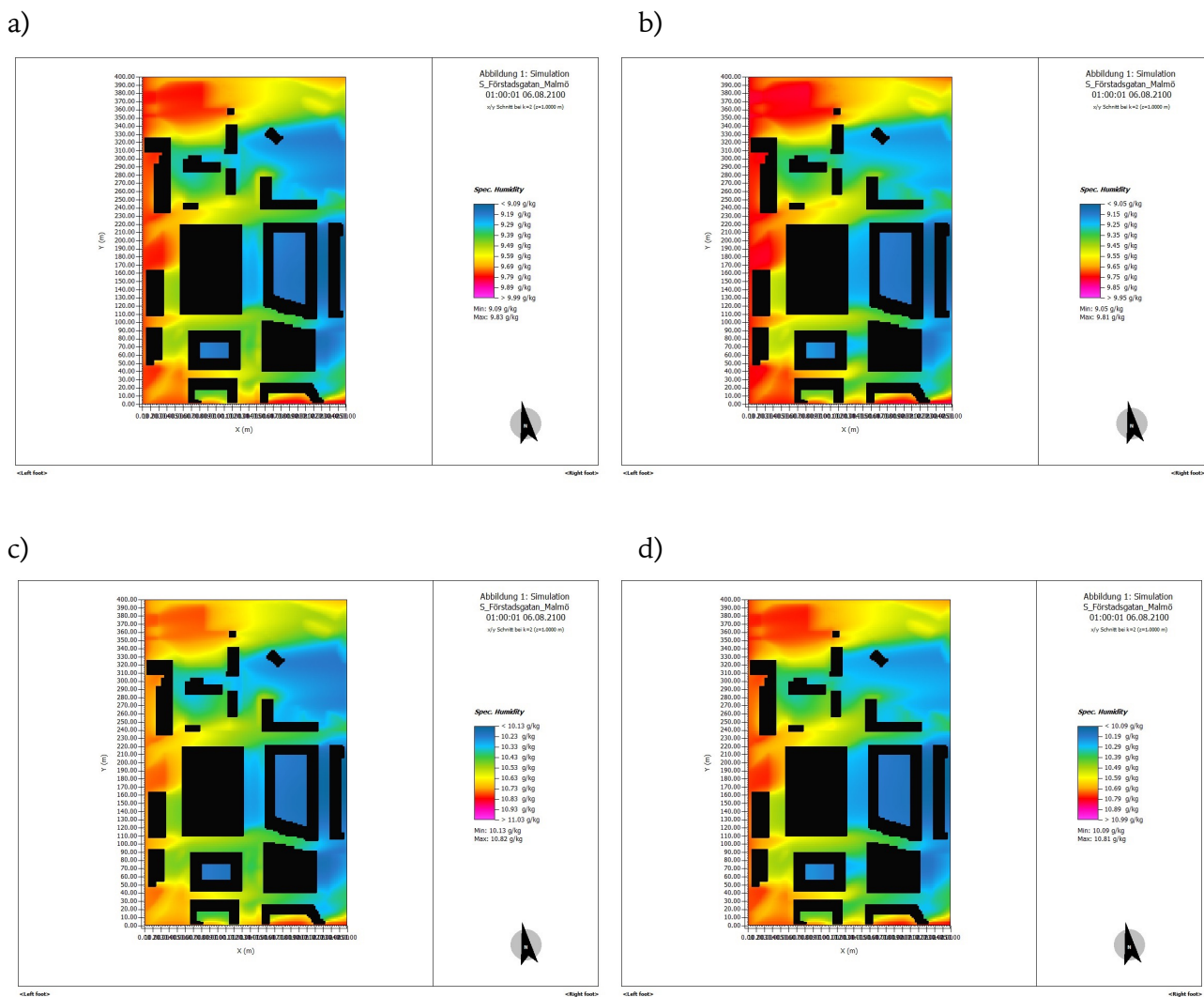


Figur 17. Den relativa luftfuktigheten inom studieområdet längs med Södra Förstadsgatan i Malmö vid 01:00
a) 1a - Ökad medeltemperatur med träd. b) 1b - Ökad medeltemperatur utan träd. c) 2a - Värmeböljan med träd. d) 2b - Värmeböljan utan träd. Illustration: Författaren, 2016.

Den specifika luftfuktigheten anger vattenången i 1 kg fuktig luft med enheten g/kg. Denna faktor anger den faktiska mängd vattenånga som finns i luften till skillnad från den relativa luftfuktigheten (Wern, 2013). I diagrammen går det tydligt att se att fallen med träd ger högre ånghalt än fallen utan träd. Se figur 18 och 19 för jämförelse. 14:00 innehåller luften 1,4 g/kg mer ånga i fallen med träd, jämfört med fallen utan träd. Således går det att hävda att luftfuktigheten höjs vid områden med vegetation och växtbäddar. Skillnaderna är konstanta hela dagen och kvällen. Dock minskar skillnaderna desto närmare midnatt dygnet fortgår. Vid 01:00 är skillnaderna små mellan de olika fallen.



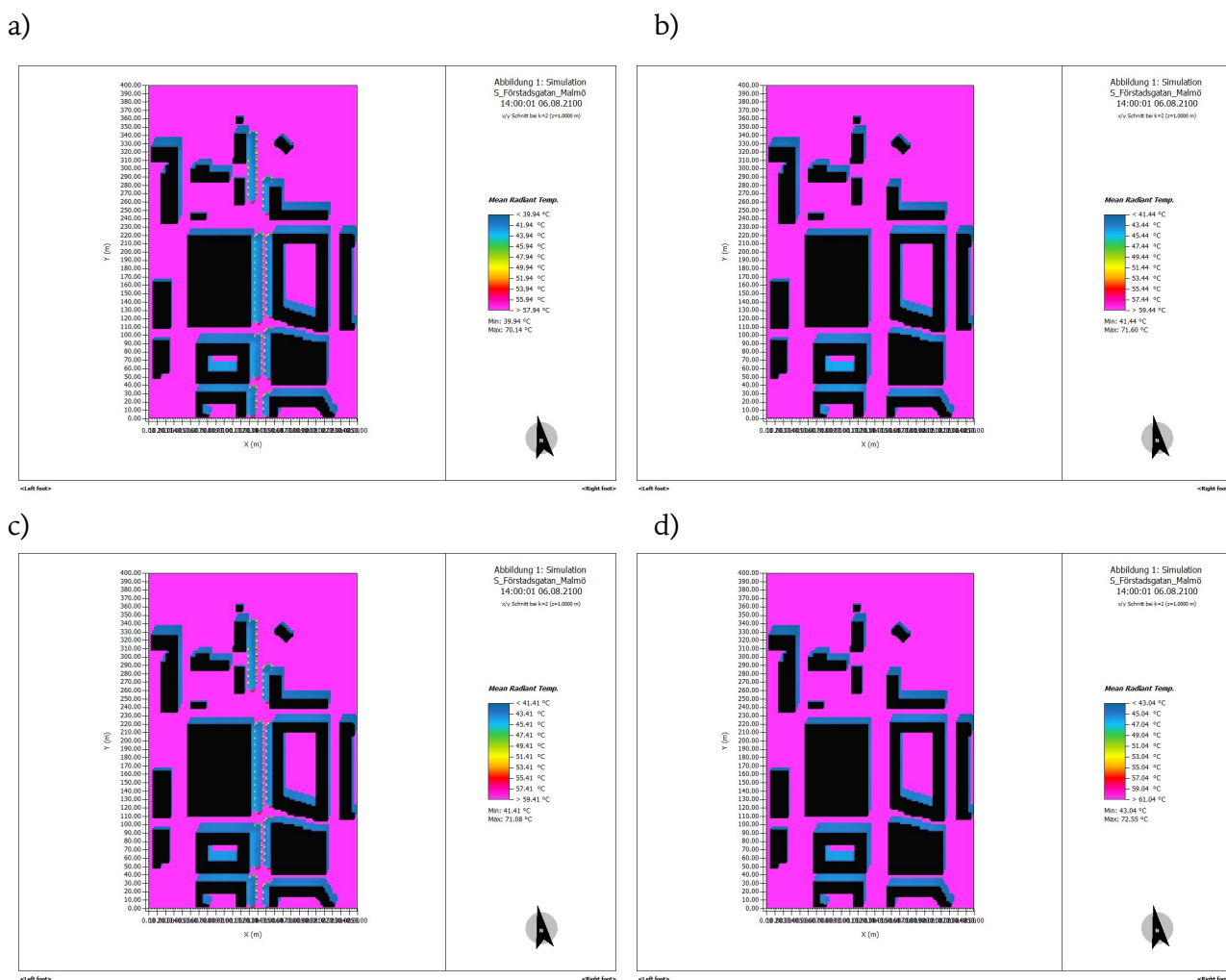
Figur 18. Den specifika luftfuktigheten inom studieområdet längs med Södra Förstadsgatan i Malmö vid 14:00. a) 1a - Ökad medeltemperatur med träd. b) 1b - Ökad medeltemperatur utan träd. c) 2a - Värmeböljan med träd. d) 2b - Värmeböljan utan träd. Illustratör: Författaren, 2016.



Figur 19. Den specifika luftfuktigheten inom studieområdet längs med Södra Förstadsgatan i Malmö vid 01:00. a) 1a - Ökad medeltemperatur med träd. b) 1b - Ökad medeltemperatur utan träd. c) 2a - Värmeböljan med träd. d) 2b - Värmeböljan utan träd. Illustratör: Författaren, 2016.

5.6 Mean Radiant Temperature (MRT)

Mean Radiant Temperature är en faktor som summerar både den kort- och långvågiga strålningen (både direkt och reflekterad) som människan utsätts för på en specifik plats. Således är detta en viktig faktor för människans energibalans och termiska komfort (Mayer & Höppe, 1987). Diagrammen visar att MRT är anmärkningsvärt hög under dagen i samtliga fall. Minimumtemperaturen i modellen är högre än lufttemperaturen, vilket den inte borde vara vid områden som är skuggade av byggnader eller vegetation. Detta kan indikera att faktorn är missvisande. Dock går det ändå att i stora drag dra vissa slutsatser avseende de skillnader som uppstår fallen emellan, trots att nivåerna i modellen kan vara felaktiga. MRT blir markant lägre under träden än i fallen utan träd. Se figur 20 för jämförelse vid 14:00. Detta framgår tydligt av de blåa nyanserna där träden står planterade. Samma skillnad gäller även 16:00.



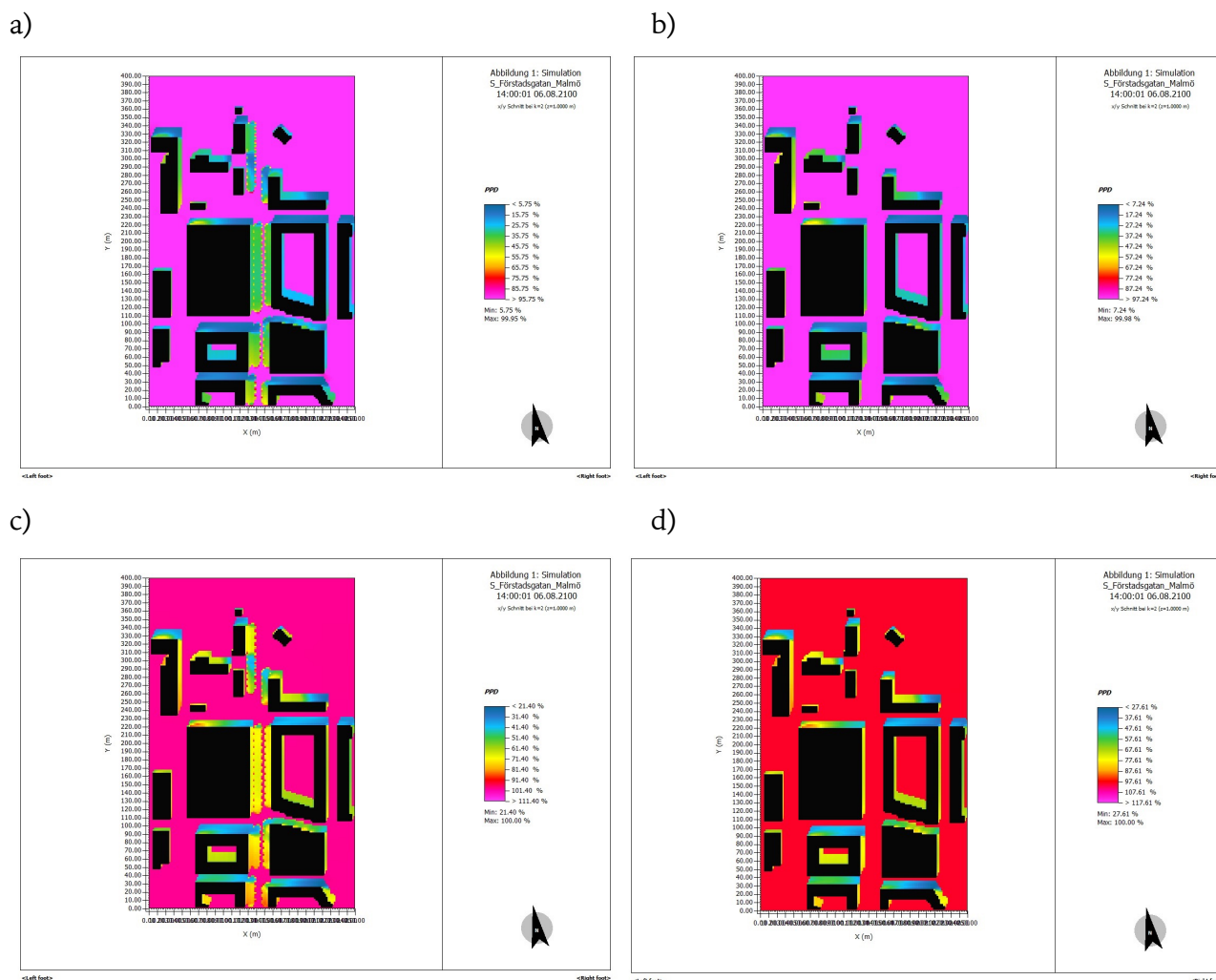
Figur 20. Mean Radiant Temperature (MRT) inom studieområdet längs med Södra Förstadsgatan i Malmö vid 14:00. a) 1a - Ökad medeltemperatur med träd. b) 1b - Ökad medeltemperatur utan träd. c) 2a - Värmeböljan med träd. d) 2b - Värmeböljan utan träd. Illustratör: Författaren, 2016.

5.7 Termisk komfort

Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) är en faktor som används för att kunna uppskatta den termiska komforten. För att räkna ut PPD tar modellen hänsyn till faktorer som kön, vikt, längd, ålder, kläder (isolationsgrad) och aktivitetsgrad. Andra faktorer som beräknas för att bestämma PPD är lufttemperatur, specifik luftfuktighet, MRT och vindhastighet. Personen som faktorn baseras på är enligt standardinställningar en sommarklädd man på 35 år, som är 175 cm lång och väger 75 kg. Mannens aktivitetsgrad är att han promenerar i moderat takt, vilket i modellen motsvarar 1,21 m/s. Nedan visas diagram från 14:00 och 16:00 när lufttemperaturen är som högst under dagen och när gatukanjonen riskerar att vara som mest ogästvänlig ur en komfortaspekt (se figur 29 och 30). När PPD är <20 % kan det anses vara god komfort och när det är <30 % kan komforten anses acceptabel, således indikerar värden över 30 % låg komfort (Hans Rosenlund, 2016).

I *ökad medeltemperatur* vid 14:00 skiljer PPD-värdet med ca. 60 % fallen emellan. Under träden ligger PPD-värdet på 35 - 45 % vilket är något högt för en acceptabel komfort. Dock är den termiska komforten betydligt bättre under träden eller i skuggan av byggnaderna än i fallet utan träd. I fallet utan träd ligger PPD-värdet nära 100 % vilket betyder att komforten är väldigt låg, samtliga människor som vistas här kommer vara missnöjda med komforten.

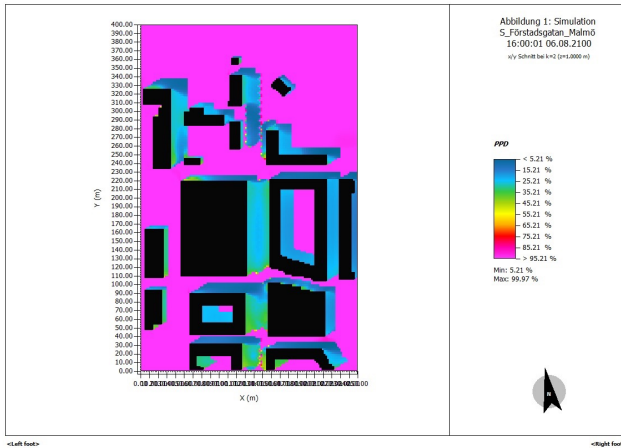
I värmeböljan vid 14:00 kommer den termiska komforten bli ännu sämre. Under träden är PPD-värdet 70 % vilket indikerar låg komfort. Komforten blir ytterligare sämre i fallet utan träd då PPD-värdet stiger till nästan 100 %. För både ökad medeltemperatur och värmeböljan uppnås högsta komforten i skuggan av byggnaderna, detta framgår av de blå nyanserna i diagrammen. Därefter uppnås nästbästa komfort under träden. Se figur 21 och 22 för jämförelse.



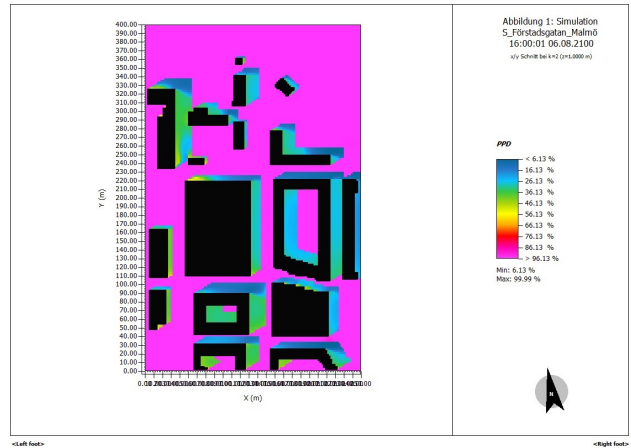
Figur 21. Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) inom studieområdet längs med Södra Förstadsgatan i Malmö vid 14:00. a) 1a - Ökad medeltemperatur med träd. b) 1b - Ökad medeltemperatur utan träd. c) 2a - Värmeböljan med träd. d) 2b - Värmeböljan utan träd. Illustratör: Författaren, 2016.

Vid 16:00 är PPD-värdet fortsatt högt i fallet utan träd. För både ökad medeltemperatur och värmebölja ligger procentsatsen på ca. 100 %. Dock går det att se att byggnadernas skuggbild breder ut sig i gatan vilket påverkar andel yta på vänster sida som får högre komfort. För ökad medeltemperatur skapar trädens skugga en acceptabel komfort på 25 - 35 %. För värmeböljan är procentsatsen fortsatt hög på 50 - 60 % men det är fortfarande väsentligt bättre komfort än i fallet utan träd.

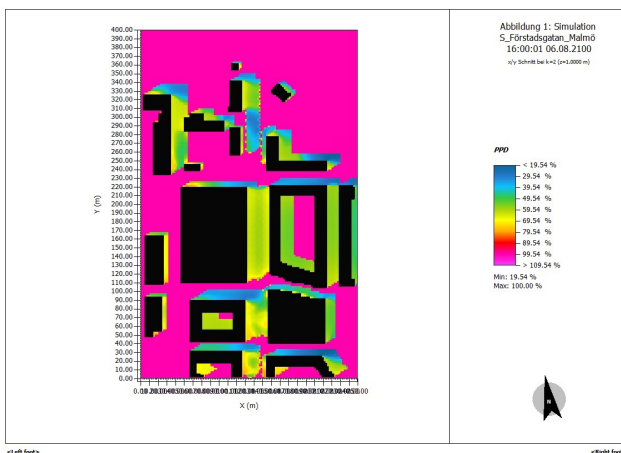
a)



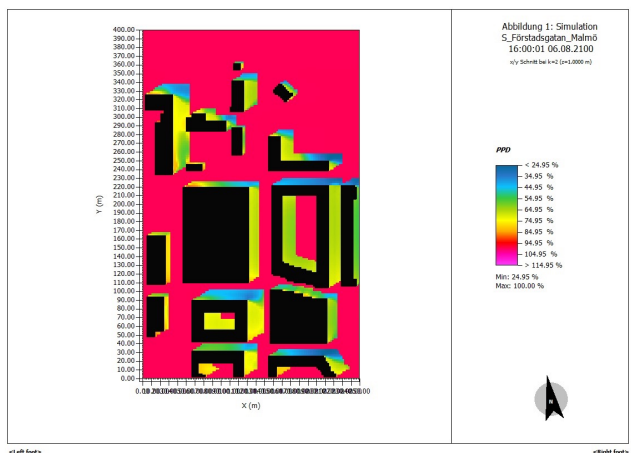
b)



c)



d)



Figur 22. Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) inom studieområdet längs med Södra Förstadsgratan i Malmö vid 16:00. a) 1a - Ökad medeltemperatur med träd. b) 1b - Ökad medeltemperatur utan träd. c) 2a - Värmeböljan med träd. d) 2b - Värmeböljan utan träd. Illustratör: Författaren, 2016.

6. Diskussion

Utifrån studien på Södra Förstadsgatan går det att vidare diskutera några av de skillnader som uppstod i gatukanjonen fallen emellan. Framförallt går det att konstatera att vegetationens närvaro påverkar mikroklimatet inom gatukanjonen under både dag- och kvällstid. För några av faktorerna är vegetationens inverkan markant, medan dess inverkan är nästintill försumbar för andra faktorer. Nedan sker en genomgång av de mest intressanta resultaten från studien med koppling till teorin i litteraturstudien.

6.1 Resultatdiskussion

6.1.1 Lufttemperatur

Det går att konstatera att lufttemperaturen inte anmärkningsvärt skiljer sig mellan fallen under dagtid. En svag skillnad på 0,15°C uppstår vid 14:00 då fallen med träd får högre temperatur än fallen utan träd. Anledningen till den svaga skillnad som uppstår kan kopplas till vindflödet, att trädkronorna bromsar upp vinden vilket kan leda till sämre nedkylning. Liknande resultat framgick i en studie i ENVI-met då täta trädkronor visade sig hindra luftutbytet ovan och under kronorna i högre utsträckning än vad glesa trädkronor gjorde (Saarela, 2012). Den svaga skillnaden jämnar dock ut sig vid 16:00 för att därefter vända och bli något större på kvällen. Vid 18:00 sker ett skifte och fallen med träd får nu lägre lufttemperatur än fallen utan träd. Mellan 18:00 - 01:00 har fallen med träd 0,2°C - 0,51°C graders lägre temperatur. Vid 01:00 uppnås den största skillnaden och detta i fokusområdets södra del. Detta kan bero på att trädens närvaro minskar värmelagringen i underliggande material, vilket i sin tur minskar den värme som frigörs från materialen på kvällen till omgivande luft.

Trots att skillnaderna är små på maximalt 0,51°C, pekar dessa resultat på att vegetation kan ha förmåga att sänka lufttemperaturer kvällstid, vilket kan ha en direkt inverkan på värmeöns storlek. Att vegetation har förmågan att sänka lufttemperaturer kvällstid kunde även Upmanis, Eliasson och Lindqvist (1998) uppvisa i sin studie från Göteborg. Temperaturskillnaden var då mer markant (5,9°C) än den skillnad som uppstod i denna studie. Dock studerade Upmanis, Eliasson och Lindqvist (1998) skillnaderna mellan grönområden och bebyggda områden och därmed inte trädrader i växtbädd inom en gatukanjon likt denna studie. Studierna har därmed stora skillnader gällande studieområdets innehåll, utformning och omfattning vilket påverkar resultatet. Trots detta går det ändå att i stora drag göra kopplingar mellan de resultat som studierna påvisar.

6.1.2 Vinden

Gällande vindflödet går det att konstatera att gatukanjonen har dåliga förutsättningar till god ventilation, oberoende om där står träd eller inte. Gatukanjonen ligger vinkelrät mot vindens riktning, vilket gör att vinden stoppas upp av byggnaderna. Längs gatorna som går parallellt med vindens riktning uppnås vindhastigheter på max 4,7 m/s, medan den uppnår 0,5- 1,02 m/s inom gatukanjonen i fallen utan träd. I fallen med träd sänks vindhastigheten ytterligare, troligtvis på grund av trädens kronor som bromsar upp den svaga vind som lyckats ta sig in i gatukanjonen.

Att vindens närvaro är svag inom gatukanjonen är däremot positivt under vinterhalvåret. I Sverige är det viktigt att både beakta vinter- och sommaraspekten vid insatser för klimatanpassning eller för att skapa gästvänliga mikroklimat. Av den anledningen går det att argumentera för att skapandet av skugga borde vara det primära i svenskt klimat under sommartid, då insatser som avser öka vinden för att öka komforten sommartid kan ge negativa följder under vinterhalvåret. Att skapandet av skugga är det primära vid höga temperaturer hävdar även Brown, Vanos, Kenny och Lenzholzer (2015). Studien längs med Södra Förstadsgatan har påvisat att stadsträd är

effektiva i syfte att skapa skugga. I så fall kan lövfällande arter vara mest lämpliga att plantera in, då dessa tappar bladen och möjliggör för solens strålar under kalla perioder vilket även ökar komforten under vinterhalvåret.

6.1.3 Yttemperatur

Gatumaterialet som exponeras för full sol uppnår markant högre yttemperatur än det gatumaterial som skuggas av träden. Maximal skillnad uppstod vid 14:00 och 16:00 när det skuggade gatumaterialet hade en yttemperatur på 26,5 - 31°C för både *ökad medeltemperatur* och *värmeböljan* och det solexponerade gatumaterialet en yttemperatur på 37 - 40°C. Genom trädens skuggning kan gatumaterialens yttemperatur sänkas med upp till 13,5°C. Detta går i linje med de resultat som Armson, Stringer och Ennos (2012) fick fram i studien som utfördes i Manchester, England. Då kunde betongens yttemperatur sänkas med 12 -19°C när det skuggades, i jämförelse med när det exponerades för full sol. Detta faktum kan minimera strålningsbelastningen för människor när de vistas här och det kan även påverka andelen värme som frigörs från gatumaterialen inom gatukanjonen under kvällstid. Att yttemperaturen blev högre i fallen med träd vid 01:00 kan bero på den begränsade himmelsfaktorn som träden orsakar. När himmelsfaktorn är låg kommer inte långvågig strålning återsändas till atmosfären och detta kan resultera i fördröjd avkylning av byggnads- och gatumaterial.

Vidare var växtbäddarnas yttemperatur anmärkningsvärt låg under samtliga tidpunkter som data plockades ut. Växtbäddarna som skuggades av träd var 6°C lägre än den omgivande lufttemperaturen vid 14:00 och 16:00 för både *ökad medeltemperatur* och *värmeböljan*. Växtbäddarna höll lägre yttemperatur än lufttemperaturen vid samtliga tidpunkter som data plockades ut (14:00 - 01:00). När växtbäddarna var fullt exponerade för sol ökade yttemperaturen något och de hade inte längre lägre yttemperatur än omgivande lufttemperatur. Dock hade växtbäddarna som var fullt exponerade för sol ungefär samma yttemperatur som det skuggade gatumaterialet.

Resultaten visar att bar jord har förmågan att hålla låg yttemperatur både när det skuggas av träd som när det är fullt exponerat för sol. Detta faktum stärker argumentet att förekomsten av naturliga ytor har möjlighet att skapa kyligare oaser i staden under varma perioder. Även dessa resultaten går i linje med Armson, Stringer och Ennos (2012) studie som kunde påvisa att gräsets yttemperatur höll lägst yttemperatur av samtliga gatumaterial, både när det var skuggat av träd som när det var fullt exponerat för sol. Även Shasua-Bar, Pearlmutter och Erell (2011) kunde i sin studie som utfördes i Israel påvisa att gräs som var skuggat av träd uppnådde lägre yttemperaturer än det skuggade hårdgjorda materialet. Författarnas slutsats var att gräs som skuggades av träd skapade de bästa temperatursänkande effekterna (Shasua-Bar, Pearlmutter & Erell, 2011).

6.1.4 Termisk komfort

MRT är anmärkningsvärt hög för hela modellen, högre än den normalt borde vara. Det går därmed att konstatera felmarginaler i modellen. Minimumtemperaturen vid 14:00 är 39°C när lufttemperaturen är 26°C (i fallet med träd vid *ökad medeltemperatur*). Detta indikerar att resultaten är missvisande då MRT bör ligga närmare lufttemperaturen i skuggan av byggnaderna. Dock går det ändå att i stora drag konstatera att MRT är betydligt lägre under träden än i full sol, även om nivåerna i modellen kan vara felaktiga. Skillnaden i MRT mellan fallen med träd respektive utan träd är ca. 30°C för både *ökad medeltemperatur* och för *värmeböljan*.

För samtliga fall uppnås högst komfort på de platser som skuggas av byggnaderna och därefter uppnås högst komfort under träden. I fallen utan träd är komforten väldigt låg för både *ökad*

medeltemperatur och *värmeböljan* med PPD-värden uppåt 100 % vid 14:00 och 16:00 när lufttemperaturen är som högst. Med dessa resultat går det att konstatera att gatukanjonen utan träd har ett ytterst ogästvänligt klimat under dagen. Trädens närvaro ökar komforten avsevärt inom gatukanjonen med PPD-värden som är 30 % och 60 % lägre än fallen utan träd vid *värmeböljan* respektive *ökad medeltemperatur*. Trots denna markanta sänkning är trädens inverkan inte tillräcklig för att nå en god eller acceptabel komfortnivå på <20 % respektive <30 %. Det är enbart i *ökad medeltemperatur* vid 16:00 som en acceptabel komfort uppnås under träden (25 - 35 %). Det går dock att ifrågasätta om det går att uppnå en god eller acceptabel komfort inom en gatukanjon när lufttemperaturen är så pass hög.

En strategi för att skapa god komfort under sommarhalvåret vore att bygga högre byggnader för att öka skuggbilden inom kanjonen och därmed öka komforten under sommarhalvåret. I studien uppnåddes nämligen högst komfort (<30 %) på de platser som skuggades av byggnaderna. Detta går i linje med annan forskning som påvisat att gatukanjoner med högt aspect ratio (h/w) ger bäst komfort vid höga lufttemperaturer eftersom kanjonen skuggbeläggs (Johansson & Emmanuel, 2006; Bourbia & Boucheriba, 2010). Dock går det att påstå att denna strategi vore olämplig för Sverige som har årstider och därmed långa perioder av kyla. Under kalla perioder skulle en högre bebyggelsestruktur skapa ogästvänliga klimat eftersom solens strålar hindras nå ner till gatunivå (Johansson, 2006). Av den anledningen går det att hävda att stadsträd är en lämplig strategi för det svenska klimatet då träden kan höja komforten under sommarhalvåret och samtidigt möjliggöra solens strålar vintertid, vilket maximerar komforten under hela året.

6.2 Egna reflektioner

Flera av tankarna som väckts under arbetets gång har rört relevansen att planera för att uppnå en kylande effekt, i ett land där vi har så många månaders kyla. Efter simuleringsstudien i ENVI-met har dock dessa tankar landat i argumentet att svenska städer måste ta hänsyn och beakta både ett vinter- och sommarklimat d.v.s. båda extremerna. Svensk fysisk planering kan ses som en balansakt där det gäller att finna lösningar som fungerar ur både ett vinter- och sommarperspektiv och som inte avsevärt försämrar den ena aspekten till fördel för den andra. En stad måste kunna erbjuda platser med värmande mikroklimat under de kalla månaderna för att förlänga utomhussäsongen men även platser med kylande mikroklimat på sommaren för att ge människor möjligheten till återhämtning. Detta särskilt för framtiden när temperaturerna stiger och mer frekventa och kraftiga värmeböljor väntas komma.

Johansson (2006a) lyfter svårigheterna kring att planera och anpassa en stad som både har varma och kalla perioder och menar att det är lättare för befolkningen att anpassa sin termiska komfort under vintern genom att anpassa isoleringsgraden med rätt klädsel. På sommaren när det är svårt att hitta skugga kan inte individen påverka den termiska komforten genom rätt klädsel i lika hög utsträckning. Därmed är det viktigt att städer kan tillhandahålla kyligare miljöer där människor kan vistas under varma dagar och som även kan öka stadens kylningsförmåga under kvälls- och nattid.

Simuleringsstudien på Södra Förstadsgatan kunde under dagtid påvisa låg komfort och en ogästvänlig utemiljö när temperaturen stiger med 4°C, samt vid rekordvarma dagar när temperaturen stiger ytterligare. Det bör även betonas att värmeböljor kan komma att bli betydligt svårare än de värden som denna studie baserats på (Persson & Wern, 2011). Komforten kan därmed komma att bli betydligt sämre än vad denna studie kunna påvisa. Sammantaget går det utifrån dessa resonemang att hävda att det är hög tid att aktivt börja arbeta med lösningar som

förbättrar stadens kylningsförmåga eftersom behovet kommer att växa i framtiden. För att lyckas med detta är det viktigt att förstå stadens karaktäristiska klimat, vilka faktorer som orsakar det samt hur och med vilka verktyg klimatet kan modifieras till ett önskvärt resultat.

Detta arbete har belyst några av dessa faktorer för att skapa en översikt över de bakomliggande orsakerna till stadens karaktäristiska klimat. Vidare har simuleringsstudien kunnat påvisa att vegetation är ett effektivt verktyg för att öka komforten dagtid samt sänka lufttemperaturen kvällstid, vilket har en inverkan på både värmeöns intensitet som lokalt för platsen ifråga. Att vegetation har en kylande effekt har även andra författare kunnat påvisa i studier som tidigare lyfts i litteraturstudien (Shashua-Bar & Hoffman, 2000; Upmanis, Eliasson & Linqvist, 1998; Givoni, 1991 m fl). Genom att placera in fler stadsträd längs med gatorna i Malmö skulle Givonis (1991) riktlinjer uppnås, om att vegetationens kylande förmåga kan utnyttjas mest effektivt genom fler mindre grönytor än flertalet stora. Dessutom är det en strategi som fungerar i redan bebyggd miljö och som inte kräver större infrastrukturella insatser eller förändringar (Gill, Handley, Ennos & Pauleit, 2007).

6.3 Metodkritik

Eftersom denna simuleringsstudie är teoretisk med syfte att studera vegetationens inverkan på gatukanjonen i stora drag, är inte gestaltningen eller placeringen av träd med sammanhängande växtbäddar realistisk. Trädens placering i denna studie kan gå emot tekniska föreskrifter gällande hur långt ifrån körbana och fasad ett träd får planteras. Vid en eventuell plantering av stadsträd på denna gata krävs troligtvis en alternativ gestaltning, vilket kan innebära färre träd. Ett alternativt gestaltungsförslag med färre träd eller annat val av trädart, hade troligtvis givit annorlunda resultat.

Det går även att diskutera markfukten på 60 % som angivits i denna studie eftersom det kan anses högt för att vara i urban miljö. Detta särskilt vid värmeböljor när temperaturen varit hög under flera dagar och när stora mängder av markfukten troligtvis avdunstat genom evapotranspirationen. I en tidigare studie i ENVI-met som studerade en fiktiv bostadsgård i Malmö, visade sig markfukten ha en betydande effekt på lufttemperaturen i hela modellen (Saarela, 2012). I studien testades markfukt på 60 % respektive 30 % och vid det högre värdet fick hela modellen 2,5°C lägre lufttemperatur. Ifall lägre nivåer av markfukt skulle ha använts vid testerna skulle det således ha kunnat påverka resultaten.

Vidare är de höga nivåerna av MRT problematiska då denna faktor kan ha påverkat andra faktorer i studien. Förklaringen till de höga nivåerna har inte gått att härleda till en specifik orsak. Det kan vara möjligt att de fyra byggnaderna inom fokusområdet som har tilldelats specifika fasadmateriell, kan ha påverkat beräkningarna av MRT. Dock går det ej att fastställa eftersom den nya versionen av ENVI-met (V.4 BETA II), som delvis innehöll förbättringar av fasadberäkningar, inte heller kunde balansera nivåerna av MRT. Eftersom samma skillnad mellan lufttemperatur och MRT bestod går det inte att fastställa det som orsak till de höga nivåerna av MRT.

6.4 Vidare forskning

För att skapa en mer rättvis och korrekt bild av vegetationens effekt och inverkan på det svenska urbana klimatet behöver detta fält beforskas ytterligare. Viktigt är även att fältstudier på mikroklimat utförs då ett resultat får en högre validitet om flera olika studier utförda med olika metoder kunnat påvisa liknande effekter eller resultat. Utförs enbart studier i modell kan resultaten bli missvisande, då modeller som tidigare nämnt aldrig kan jämföras med verkligheten.

I fältstudier blir det dock svårt att studera ett framtida klimat med den temperaturhöjning som väntas. Fältstudier får således planeras och utföras under varmare perioder på sommarhalvåret för att kunna studera vegetationens kylande effekt.

Ytterligare tankar som utvecklats under arbetets gång rör studieområdet för den egna studien och gatukanjonens förutsättningar. Platsens förutsättningar gör resultaten unika för just den gatukanjon som studien baserats på. Först och främst är gatukanjonens orientering nord/sydlig vilket betyder att den inte kommer utsättas för lika långvarig solstrålning som en gatukanjon med riktningen öst/väst (Taleghani et al., 2015). Vid 16:00 är halva gatukanjonen skuggad av byggnaderna, speciellt den västra sidan där cykelvägen löper och där flest människor vistas. Vidare har gatukanjonen dåliga förutsättningar till ventilation eftersom den är belägen vinkelrät mot vindens riktning. Det finns därmed anledning att göra ytterligare tester på en gatukanjon med motsatt orientering i Malmö för att se om resultaten blir annorlunda. En öst/västligt orienterad gatukanjon är längre exponerad för sol men samtidigt utsätts den för högre vindhastigheter. Dessa faktorer skapar andra förutsättningar som både kan vara positiva och negativa ur ett mikroklimatsperspektiv och därmed intressanta att jämföra.

Vidare skulle det vara intressant att utföra studier som testar vegetationens inverkan vid kraftigare värmeböljor än de värden denna studien utgått ifrån. Persson och Wern (2011) menar att svenska värmeböljor i framtiden kan komma att uppnå 40°C. Det vore således intressant att studera hur vegetation kan påverka det urbana klimatet under kvälls- och nattid eftersom detta är den tid som människor har möjlighet att återhämta sig, i synnerhet de människor som är särskilt utsatta vid höga temperaturer (Boverket, 2010). Vidare finns det anledning att göra dessa studier på olika städer i Sverige eftersom topografi, utformning och därmed förutsättningar skiljer sig åt städer emellan.

7. Slutsats

- *Vilka effekter har stadsträd och sammanhängande växtbäddar på klimatet på en utvald del av Södra Förstadsgatan i Malmö under en framtida sommardag?*

Stadsträden och växtbäddarna har en markant inverkan på den termiska komforten och yttemperaturen inom gatukanjonen under dagtid samt en mindre inverkan på lufttemperaturen under kvälls- och nattid. Både dag-, kvälls- och nattid hade fallen med träd högre luftfuktighet än fallen utan träd. Den termiska komforten som uppmättes i PPD (Predicted Percentage of Discomfort) visade att gatukanjonen utan träd fick väldigt låg komfort under dagtid när lufttemperaturen är som högst inom gatukanjonen. Den höga procentsatsen indikerar att samtliga personer som vistas inom gatukanjonen kommer uppleva klimatet som ogästvänligt. När gatukanjonen skuggades av träd kunde nivåerna av PPD sänkas markant.

Vidare kunde de hårdgjorda gatumaterialens och växtbäddarnas yttemperatur sänkas markant genom trädens beskuggning. Anmärkningsvärt var att de skuggade växtbäddarnas yttemperatur var uppåt 6°C lägre än den omgivande lufttemperaturen vid 14:00 och 16:00. Växtbäddarna hade lägre yttemperatur än omgivande lufttemperatur vid samtliga tidpunkter som data plockades ut (14:00 - 01:00). Ett faktum som visar att naturliga markytor som skuggas av träd har förmågan att skapa kyligare oaser i staden när lufttemperaturen är hög, vilket är betydelsefull kunskap vid skapandet av svalkande miljöer i städer för sommarhalvåret. Det hårdgjorda gatumaterialets yttemperatur kunde sänkas med upp till 13,5°C när det skuggades av träd, jämfört med när det var fullt exponerat för solens strålar. Detta faktum minimerar strålningsbelastningen för människor när de vistas här, vilket i sin tur påverkar den termiska komforten. Detta kan även påverka andelen värme som frigörs från gatumaterialen inom gatukanjonen under kvällstid. Vidare går det att konstatera att naturliga ytor får en markant lägre yttemperatur än artificiella ytor vid solexponering, något som simuleringen av skuggade växtbäddars yttemperatur visade.

Vegetationen hade även en mindre inverkan på lufttemperaturen under kvälls- och nattid, med en maximal skillnad på 0,51°C vid 01:00. Att vegetationens närvaro kan sänka lufttemperaturer kvälls- och nattid har både inverkan för platsen lokalt men även för värmeöns storlek. Vegetationen hade även inverkan på luftfuktigheten då fallet med träd hade högre relativ och specifik luftfuktighet under samtliga tidpunkter som data plockades ut. Den högre luftfuktigheten kan kopplas till den högre evapotranspiration som sker vid vegetativa ytor.

- *Vilka effekter har stadsträd och sammanhängande växtbäddar på klimatet på en utvald del av Södra Förstadsgatan i Malmö under en framtida värmebölja?*

Studien visar att vegetationen påverkar gatukanjonens lufttemperatur, yttemperatur och luftfuktighet, även vid en framtida värmebölja. Den största skillnaden mellan temperaturscenarierna rör den termiska komforten som mäts i PPD (Predicted Percentage of Discomfort). Nivåerna av PPD är högre vid värmeböljan än de är vid ökad medeltemperatur. När lufttemperaturen stiger kommer trädens skuggande effekt inte kunna sänka den termiska komforten till acceptabla nivåer. Trots att acceptabla nivåer av PPD inte uppnåddes under träden, kommer trädens närvaro markant förbättra komforten i jämförelse med när gatukanjonen inte har träd eller sammanhängande växtbäddar.

Sammantaget visar dessa resultat att stadsträd i sammanhängande växtbäddar kan öka den specifika gatukanjonens kylningsförmåga och skapa behagligare klimat under dag-, kvälls- och nattid på sommaren. Detta är betydelsefull kunskap för framtiden, då lösningar som kan öka stadens kylningsförmåga är högt efterfrågade inför städernas kommande utmaningar med successivt stigande temperaturer och mer frekventa och svåra värmeböljor på sommaren. Vidare visar resultaten att närvaron av vegetation har potential att minimera värmeöns storlek genom att lokalt sänka lufttemperaturer under kvälls- och nattid.

Referenslista

Tryckta källor

Ahmad, K., Khare, M. & Chaudhry, K. (2005). Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections - a review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 98, ss. 697-717.

Airola, H. & Myllynen, M. (2015). *Luftkvaliteten vid planering av markanvändningen*. Handbok, 3. Närings-, trafik- och miljöcentralen. Tillgänglig: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/115806/Luftkvaliteteten%20OPAS_3_2015.pdf?sequence=2 Hämtad 2016-03-02

Akbari, H., Pomerantz, M. & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, Vol. 70 (3), ss. 295-310.

Ali-Toudert, F. (2005). Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate, *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg*, No. 15. Tillgänglig: <https://www.meteo.uni-freiburg.de/forschung/publikationen/berichte/report15.pdf> Hämtad 2016-02-24

Ambrosini, D., Galli, G., Manchini, B., Nardi, I. & Sfarra, S. (2014). Evaluating mitigation effects of urban heat islands in a historical small center with the ENVI-met climate model. *Sustainability*, Vol. 6, ss. 7013-7029.

Bogren, Jörgen, Gustavsson, Torbjörn & Loman, Göran (1999). *Klimatologi, meteorologi*. [Ny, omarb. och utök. utg.] Lund: Studentlitteratur

Bourbia, F. & Boucheriba, F. (2010). Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). *Renewable Energy*, Vol. 35, ss. 343-347.

Boverket. (2010). *Mångfunktionella ytor: klimatanpassning av befintlig bebyggd miljö i städer och tätorter genom grönstruktur*. Karlskrona: Boverket Tillgänglig: http://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2010/mangfunktionella_ytor.pdf Hämtad: 2016-04-29

Boverket. (2009). *Bygg för morgondagens klimat: anpassning av planering och byggande*. Karlskrona: Boverket. Tillgänglig: http://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2009/bygg_for_morgondagens_klimat.pdf Hämtad: 2016-04-30

Brown, R. D. & Gillespie, T. J. (1995). *Microclimatic Landscape Design - Creating Thermal Comfort and Energy Efficiency*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Carfan, A-C., Galvani, E. & Nery, J-T. (2012). Study of thermal comfort in the City of São Paulo using ENVI-met model. *Investigaciones Geográficas*, Vol. 78, ss. 34-47.

Chen J. M. & Black, T. A. (1992). Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment*, Vol. 15, ss. 421-429.

Doulos, L., Santamouris, M. & Livada, I. (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar energy*, Vol. 77 (2), ss. 231-249.

Dimoudi, A. & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, Vol. 35, ss. 69-76.

- Di Maria, V., Rahman, M., Collins, P., Dondi, G. & Sangiorgi, C. (2013). Urban Heat Island Effect - thermal response from different types of exposed paved surfaces. *International journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 6 (4), ss. 414-422.
- Elnahas, M-M. (2003). The effects of urban configuration on urban air temperatures. *Architectural Science Review*, Vol. 46, ss. 135-138.
- Eliasson, I. (2000). The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 48, ss. 31-44.
- Eliasson, I. (1996). Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmospheric Environment*, Vol. 30, ss. 379-392.
- Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I. & Simonsson, M. (2011). *Marklära*. Lund: Studentlitteratur
- Eschenbach, C. & Kappen, L. (1996). Leaf index determination in an alder forest: a comparison of three methods. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 47, ss. 1457-1462.
- Frumkin, H. & McMichael, A-J. (2008). Climate Change and Public Health: Thinking, Communicating, Acting. *American Journal of Preventive Medicine*, Vol. 35 (5), ss. 403-410.
- Geiger, Rudolf (1965). *The climate near the ground*. Transl. from the 4. German ed. Cambridge, Mass.: Harvard University Press
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R. & Pauleit, S. (2007). Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. *Built Environment*, Vol. 33 (1), ss. 115-133.
- Givoni, B. (1991). Impact of planted areas on urban environmental quality: a review. *Atmospheric Environment*, Vol. 25, ss. 289-299.
- Geros, V., Santamouris, M., Karatasou S., Tsangrassoulis, A. & Papanikolaou, N. (2005). On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment. *Energy and Buildings*, Vol. 37, ss. 243-257.
- Glaumann, M. & Westerberg, U. (1988). *Klimatplanering Vind*. Stockholm: AB Svensk byggtjänst.
- Grimmond, C.S.B. & Oke, T. R. (1995). Comparison of heat fluxes from summertime observations in the suburbs of four North American cities. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 34, ss. 873-889.
- Hunjo, T. & Takakura, T. (1990). Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas. *Energy and Buildings*, Vol. 15, ss. 443-446.
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, Vol. 43, ss. 71-75.
- Jansson, M., Persson, A. & Östman, L. (2013). *Hela staden: argument för en grönblå stadsbyggnad*. Alnarp: Movium. Tillgänglig: <http://www.movium.slu.se/system/files/news/9265/files/helastaden-1.pdf> Hämtad: 2016-02-24

- Johansson, E. (2006a). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: a study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, Vol. 41, ss. 1326-1338.
- Johansson, E. (2006b). *Urban Design and Outdoor Thermal comfort in warm climates*. Diss., Lunds Universitet.
- Katayama, T., Hayashi, T., Ishii, A. & Tsutsumi, J. (1993). Field surveys on cooling effects of vegetation in an urban area. *Journal of Thermal Biology*, Vol. 18, ss. 571-576.
- Konarska, J., Lindberg, F., Larsson, A., Thorsson, S. & Holmer, B. (2013). Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees - application for outdoor thermal comfort modelling. *Theoretical Application Climatology*, Vol. 117, ss. 363-376.
- Konijnendijk, C., Nilsson, K., Randrup, T. & Schipperijn, J. (2005). *Urban Forests and Trees: A Reference Book*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Landsberg, H-E. (1981). *The urban climate*. New York: Academic P.
- Lindberg, F., Grimmond, C. S. B., Yogeswaran, N., Kotthaus, S. & Allen, L. (2013). Impact of city changes and weather on anthropogenic heat flux in Europe 1995-2015. *Urban Climate*, Vol. 4, ss. 1-15.
- Magnusson, T. (2009). Skogsskötselserien nr 13, *Skogsbruk, mark och vatten*. Jönköping: Skogsstyrelsen. Tillgänglig: <http://www.skogsstyrelsen.se/Global/PUBLIKATIONER/Skogsskotselserien/PDF/13-Skogsbruk%20-%20mark%20och%20vatten.pdf> Hämtad: 2016-02-09
- Mayer, H. & Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 38, ss. 43-49.
- McPherson, E., Nowak, D. J. & Rowntree, R. A. (1994). *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. (General Technical Report No. NE-186), U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Radnor, Tillgänglig: http://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_ne186.pdf Hämtad: 2016-03-09
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. 2. ed. London: Routledge
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 108, ss. 1-24.
- Oke, T. R., Johnson, G. T., Steyn, D. G. & Watson, D. (1991). Simulation of surface urban heat islands under 'Ideal' conditions at night part 2: diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 56, ss. 339-358.
- Perini, K. & Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban For Urban Green*, Vol. 13, ss. 495-506.
- Persson, G. & Wern, L. (2011). *Värmeböljor i Sverige*. Norrköping: SMHI. Tillgänglig: http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.16889!webbFaktablad_49.pdf Hämtad: 2016-05-13

Rosenberg, N. J., Blad, B. L. & Verma, S. B. (1983). *Microclimate: the biological environment*. 2. ed. New York: Wiley

Saarela, L. (2012). *Att sänka temperaturer i stadsmiljö: en studie om trädens effekt på en bostadsgård i Malmö*. Kandidatuppsats. Alnarp: Sveriges Lantbruksuniversitet i Alnarp/ Institutionen för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap. Tillgänglig: http://www.greenurbansystems.eu/sv/resultat/Documents/GrGr_WP5_Att-sänka-temperaturer-i-stadsmiljö_Saarela.pdf Hämtad: 2013-05-13

Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island: a review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 26, ss. 224-240.

Shashua-Bar, L. & Hoffman, M.E. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: an empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*, Vol. 31, ss. 221-235.

Shashua-Bar, L. & Hoffman, M. E. (2004). Quantitative evaluation of passive cooling of the UCL microclimate in hot regions in summer, case study: urban streets and courtyards with trees. *Building and Environment*, Vol. 39, ss.1087-1099.

Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D. & Erell, E. (2011). The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International Journal of Climatology*, Vol. 31, ss. 1498-1506.

Shinzato, P., Duarte, D. (2012). *Microclimatic effect of vegetation for different leaf area index- LAI*. Proceedings of the 28th PLEA conference. Lima, Peru 7-9 November 2012.

Simpson, M., Raman, S., Lundquist, J., Leach, M. (2007). A study of the variation of urban mixed layer heights. *Atmospheric Environment*, Vol. 41, ss. 6923-6930

Statens offentliga utredningar (SOU). *Sverige inför klimatförändringarna - hot och möjligheter*. SOU 2007:60 Klimat och sårbarhetsutredningen. 2007. Tillgänglig: <http://www.regeringen.se/sb/d/8704/a/89334> Hämtad: 2016-05-13

Svensson, M. (2004). Sky view factor analysis- implications for urban air temperature differences. *Meteorological Applications*, Vol. 11, s. 201-211.

Svensson, M & Eliasson I. (1999). *Lokalklimatet i planeringen När? Var? Hur?*. Rapport: 5021. Stockholm: Naturvårdsverket.

Taha, H. (2008). Meso-urban meteorological and photochemical modeling of heat island mitigation. *Atmospheric Environment*, Vol. 42, ss. 8795-8809.

Tallis, M., Taylor, G., Sinnet, D. & Freer-Smith, P. (2011). Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 103, ss. 129-138.

Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M. & Van den Dobbelsteen, A. (2015). Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, Vol. 83, ss. 65-78.

Thorsson, Sofia (2012). *Stadsklimatet: åtgärder för att sänka temperaturen i bebyggda områden*. Stockholm: Avdelningen för försvarsanalys, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI). Tillgänglig: <http://www.foi.se/rapport?rNo=FOI-R--3415--SE> Hämtad: 2016-02-09

Upmanis H. (1999). The Influence of Sky View Factor and Land use on City Temperatures, i Upmanis H. (1999). *Influence of Parks on Local Climate*, Earth Sciences Centre, Göteborg University A 43: paper 3.

Upmanis, H., Eliasson, I. & Lindqvist, S. (1998). The Influence of Green Areas on Nocturnal Temperatures in a High Latitude City (Göteborg, Sweden). *Journal of Climatology*, Vol. 18, ss. 681-700.

Watkins, R., Palmer, J. & Kolokotroni, M. (2007). Increased temperature and intensification of the urban heat island: implications for human comfort and urban design. *Built Environment*, Vol. 33, ss. 85-96.

Westlin, Stina (2012). *Klimatanpassning i fysisk planering: vägledning från länsstyrelserna*. Malmö: Länsstyrelsen i Skåne län.

Wern, Lennart (2013). *Luftfuktighet: variationer i Sverige*. Norrköping: SMHI. Tillgänglig: http://www.smhi.se/sgn0106/if/biblioteket/rapporter_pdf/Meteorologi_154.pdf Hämtad: 2016-05-13

Whitford, V., Ennos, A., & Handley, J. (2001). City form and natural process - indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. *Landscape and urban planing*, Vol. 57, ss. 91-103.

Wong, E., Hogan, K., Rosenberg, J., Denny, A. (2008). *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics*. EPA Protection Partnership Division in the U.S. Environmental Protection Partnership Agency's Office of Atmospheric Programs Climate, Washington DC, USA. Tillgänglig: <http://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/basicscompendium.pdf> Hämtad: 2016-02-15

Yamashita, S., Sekine, K., Shoda, M., Yamashita, K. & Hara, Y. (1986). On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama river basin, Japan. *Atmospheric Environment*, Vol. 20, ss. 681-686.

Yang, J., Wang, Z-H. & Kaloush, K. (2015). Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a 'silver bullet' for mitigating urban heat island?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 47, ss. 830-843.

Yang, X., Zhao, L., Bruse, M. & Meng, Q. (2013). Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. *Building and Environment*, Vol. 60, ss. 93-104.

Otryckta källor

EnergyPlus. (2016). *Weather Data Sources*. <https://energyplus.net/weather/sources> Hämtad: 2016-05-13

Google Maps. (2016). *Kartbild över Södra Förstadsgatan i Malmö*. Tillgänglig: <https://www.google.se/maps/@55.5873062,13.0067548,432m/data=!3m1!1e3> Hämtad: 2016-05-13

Meteonorm. (2016). *Irradiation data for every place on earth*. Tillgänglig: <http://www.meteonorm.com>
Hämtad: 2016-04-18

Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut [SMHI]. (2016a). *Klimatindikator- Temperatur*. Tillgängligt: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/klimatindikator-temperatur-1.2430>
Hämtad: 2016-01-26

Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut [SMHI]. (2016b). *Klimatscenarier*. Tillgänglig: <http://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/klimatscenarier?area=lan&var=tmax&sc=rcp85&seas=som&dnr=12&sp=sv&sx=0&sy=268#area=lan&dnr=12&sc=rcp85&seas=som&var=tmax> Hämtad: 2016-05-13

Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut [SMHI]. (2014). *Markens roll i en numerisk prognosmodell*. Tillgänglig: <http://www.smhi.se/forskning/forskningsomraden/analys-prognos/markens-roll-i-en-numerisk-prognosmodell-1.348> Hämtad: 2016-02-11

Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut [SMHI]. (2016c). *Naturliga faktorer som påverkar klimatet*. Tillgänglig: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/naturliga-faktorer-som-paverkar-klimatet-1.3831> Hämtad: 2016-02-09

Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut [SMHI]. (2015a). *Solstrålning*. Tillgänglig: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/solstralning-1.4186> Hämtad: 2016-02-15

Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut [SMHI]. (2015b). *Vindens kyleffekt*. Tillgänglig: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/vindens-kyleffekt-1.259> Hämtad: 2016-05-13

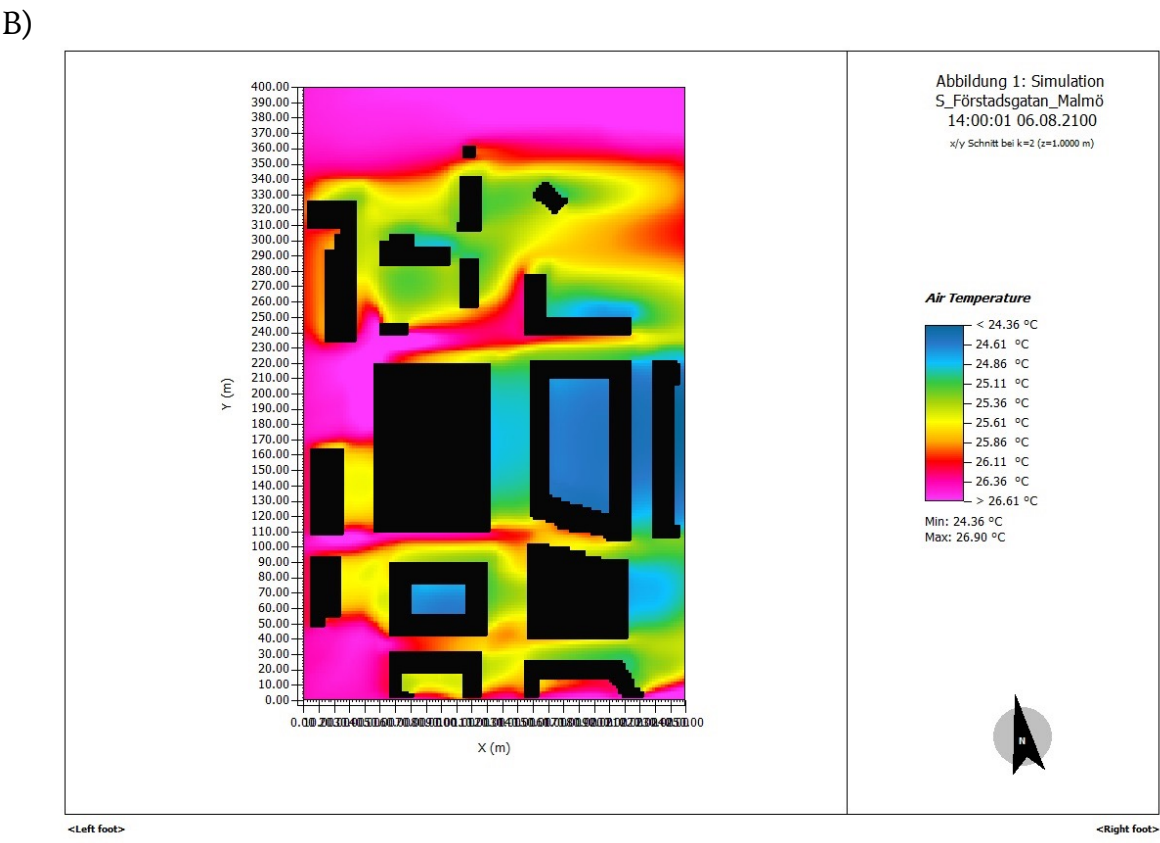
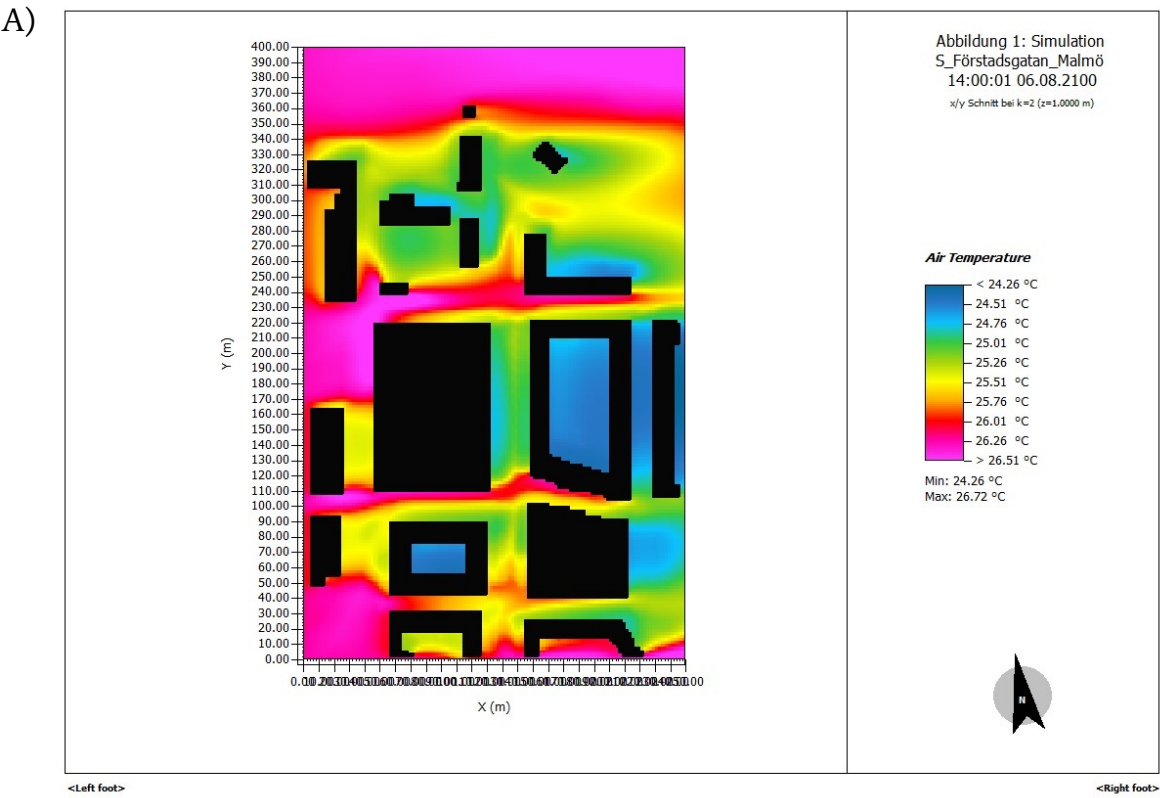
Icke publicerat material

Hans Rosenlund CEC Design AB. (2016). E-mail den 14/04/2016.

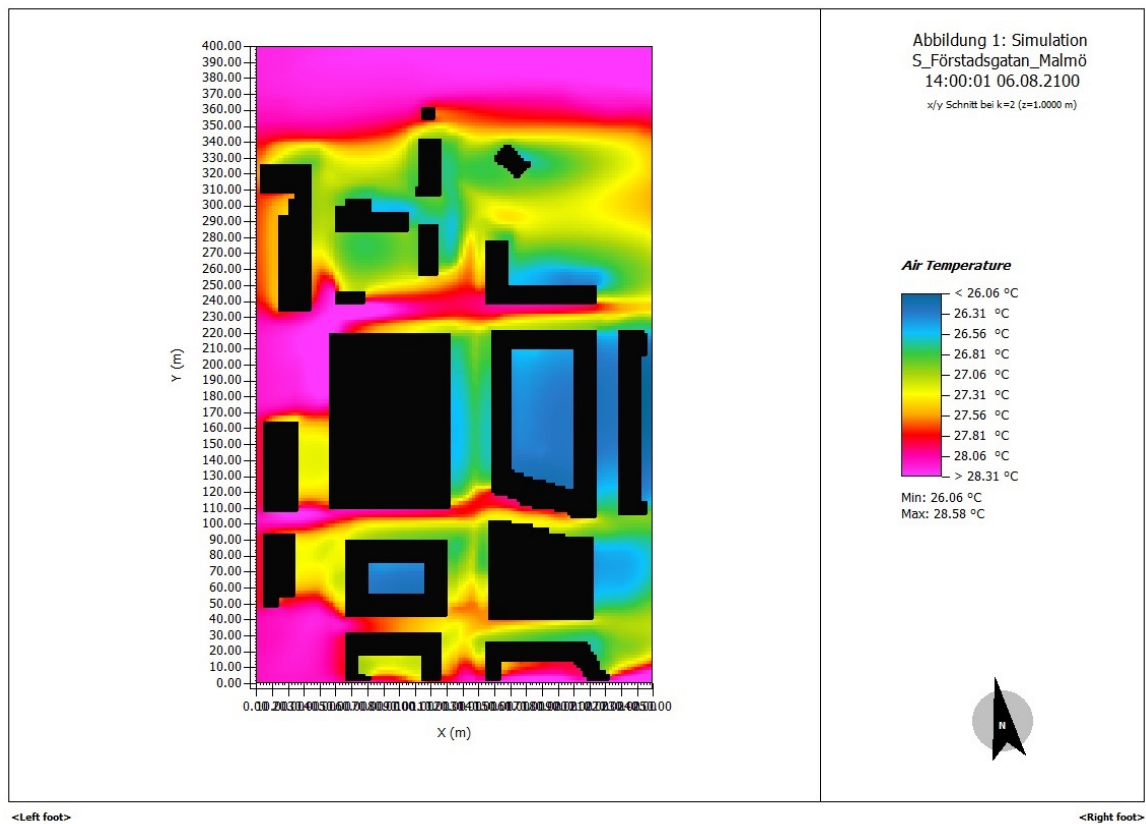
Bilaga 1

Resultatdiagrammen från ENVI-met i större format.

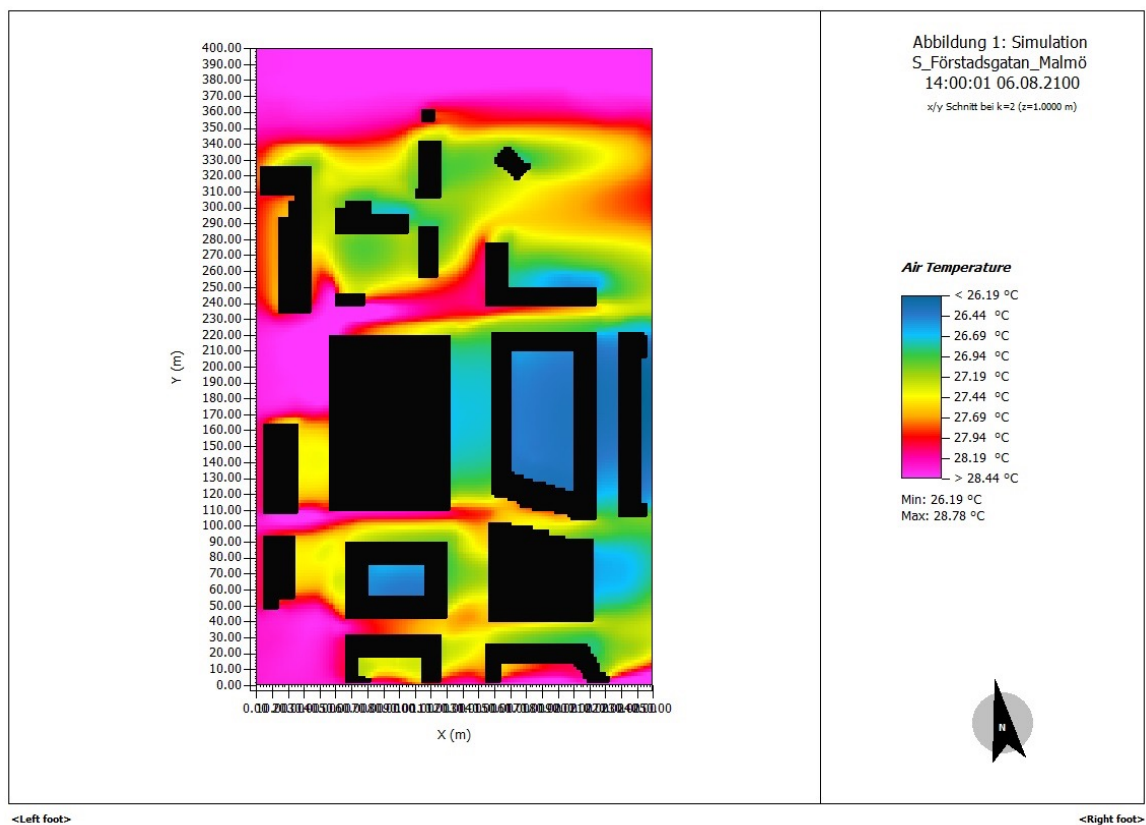
LUFTTEMPERATUR ÖKAD MEDELTEMPERATUR 14:00 A) Med träd B) Utan träd



A)



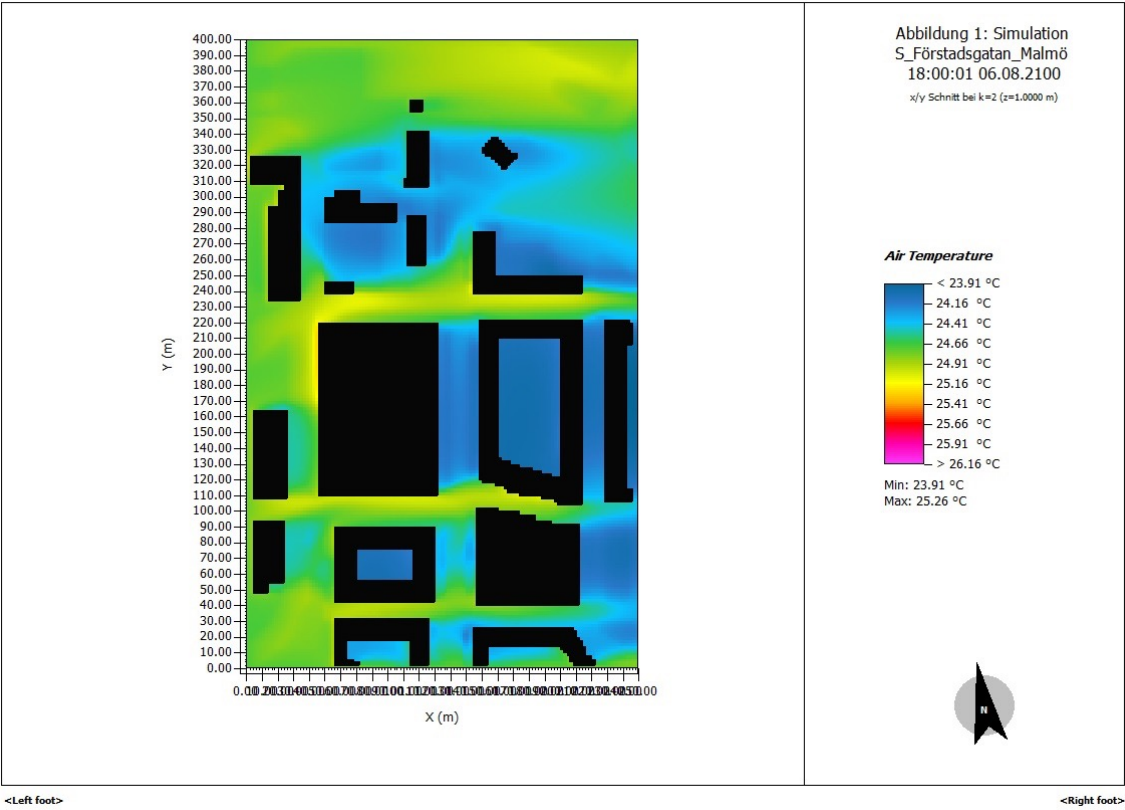
B)



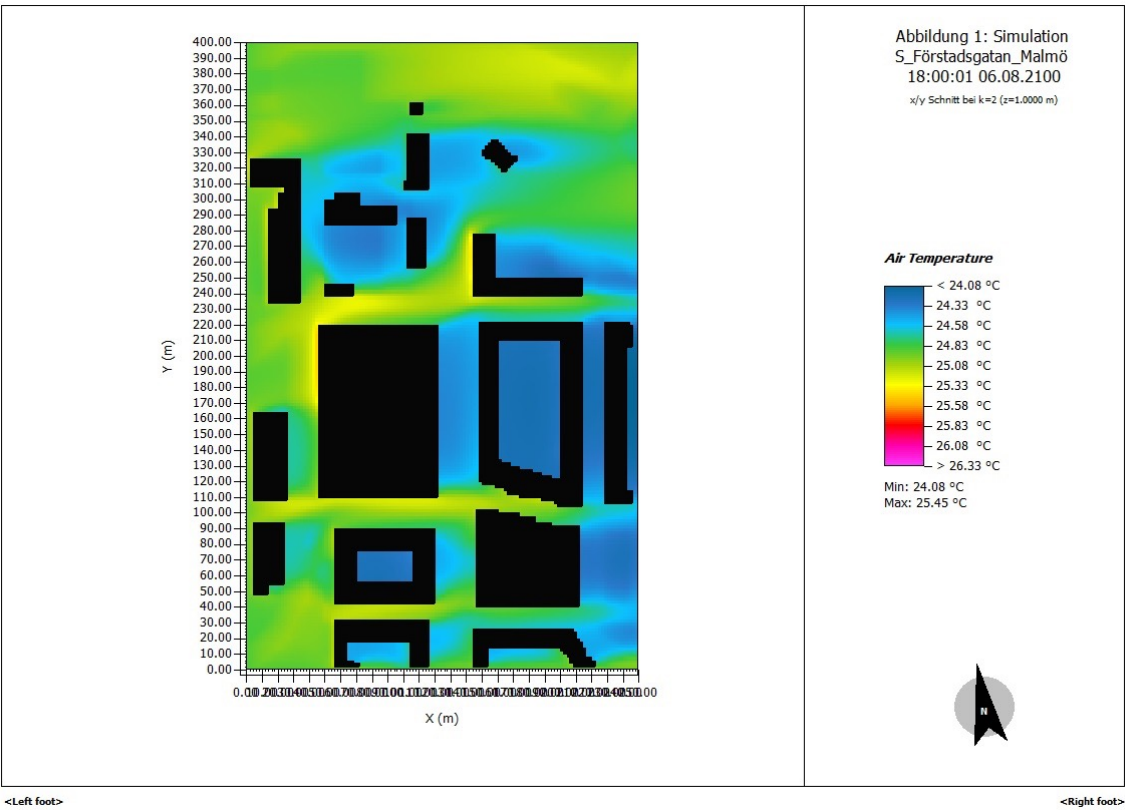
LUFTTEMPERATUR ÖKAD MEDELTEMPERATUR 18:00

A) Med träd B) Utan träd

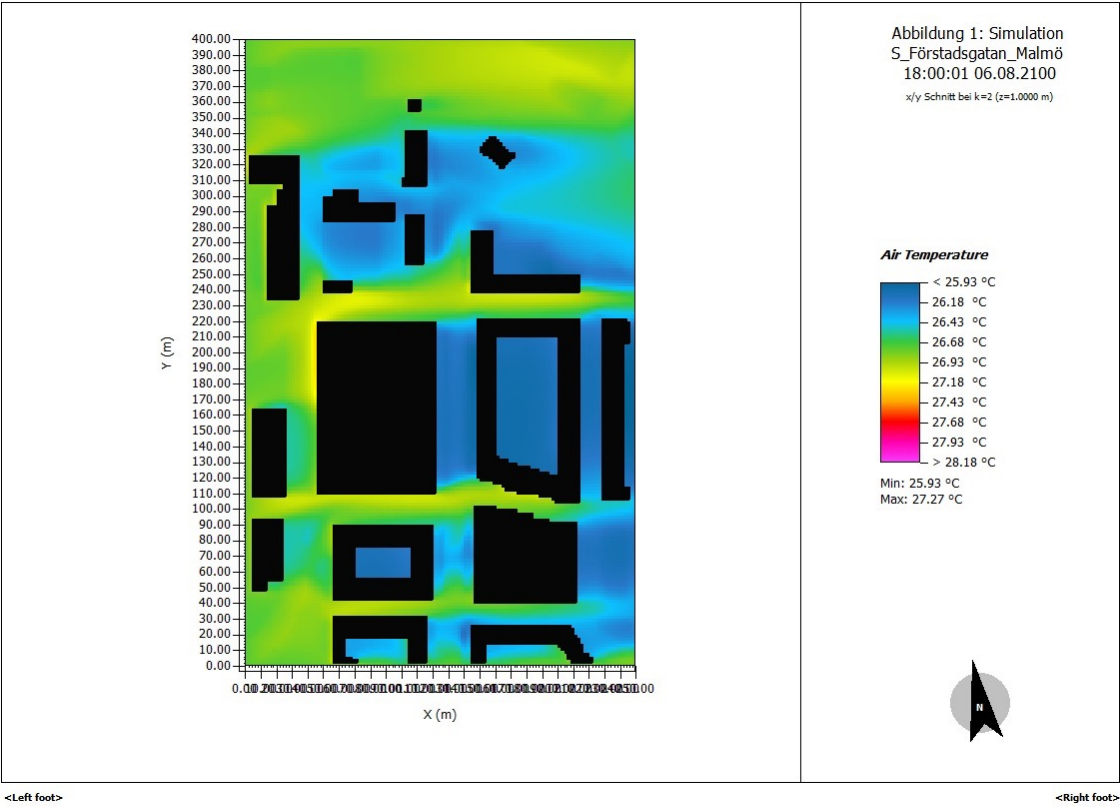
A)



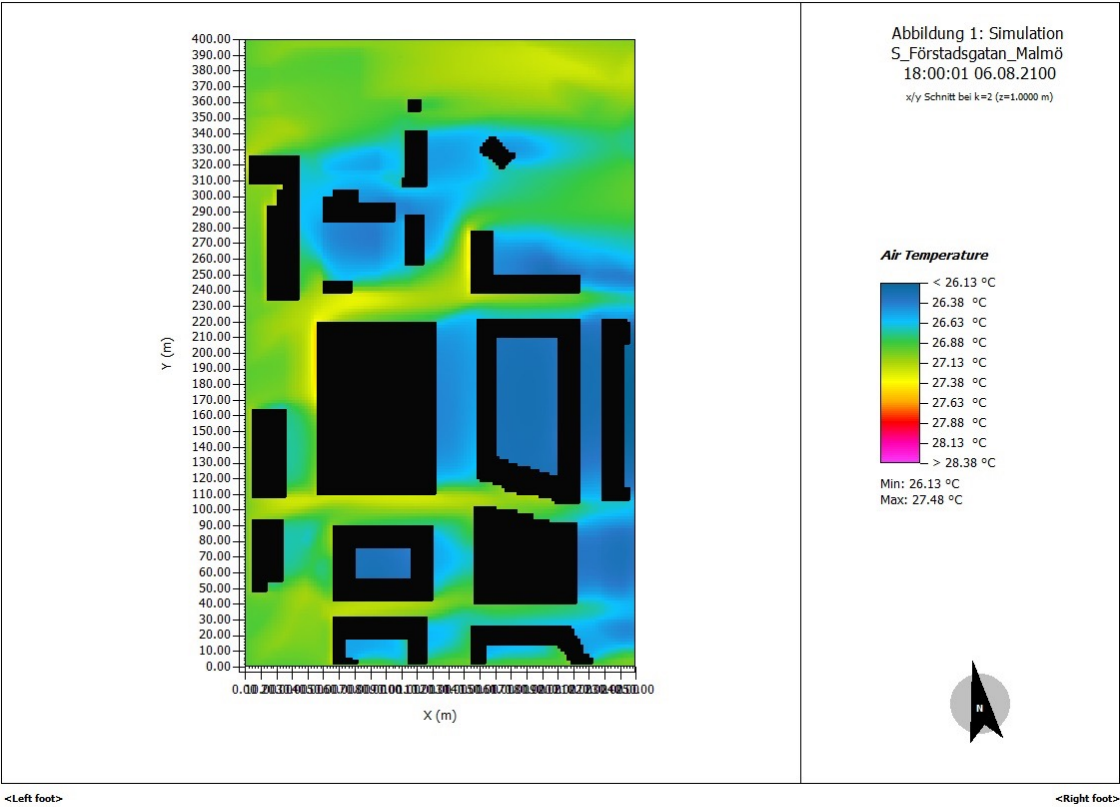
B)



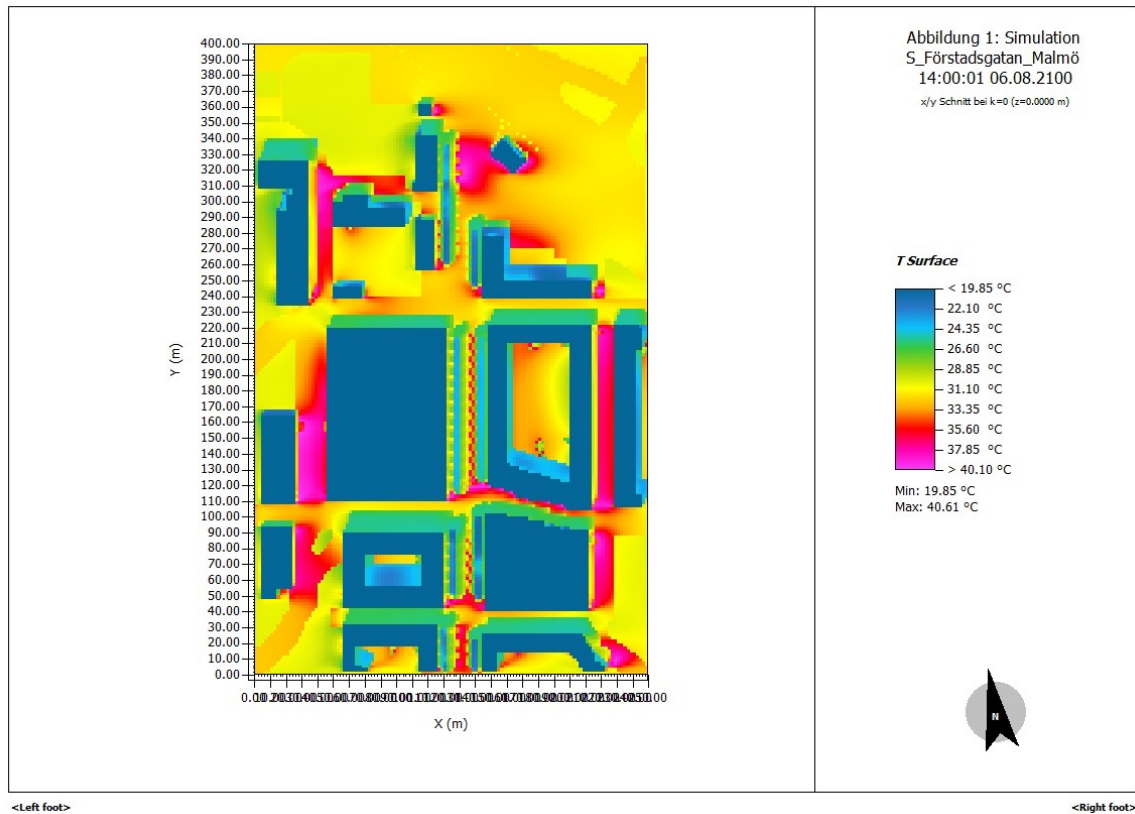
A)



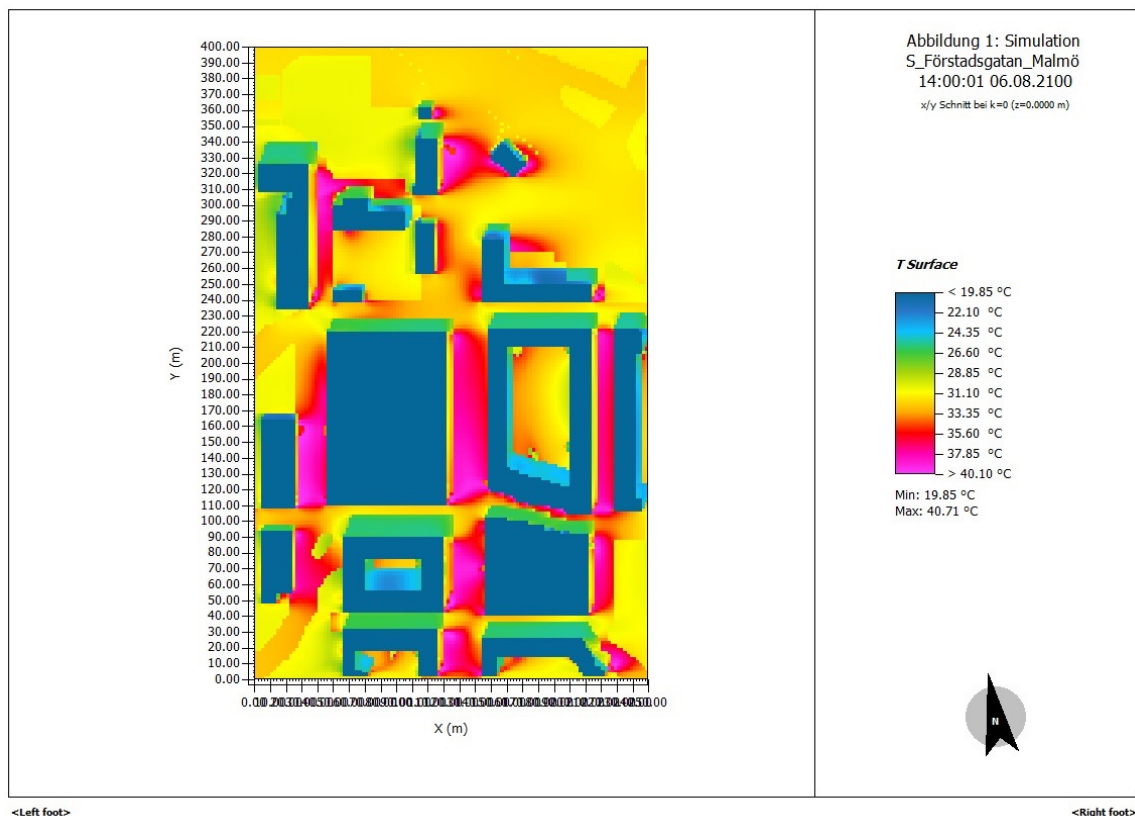
B)



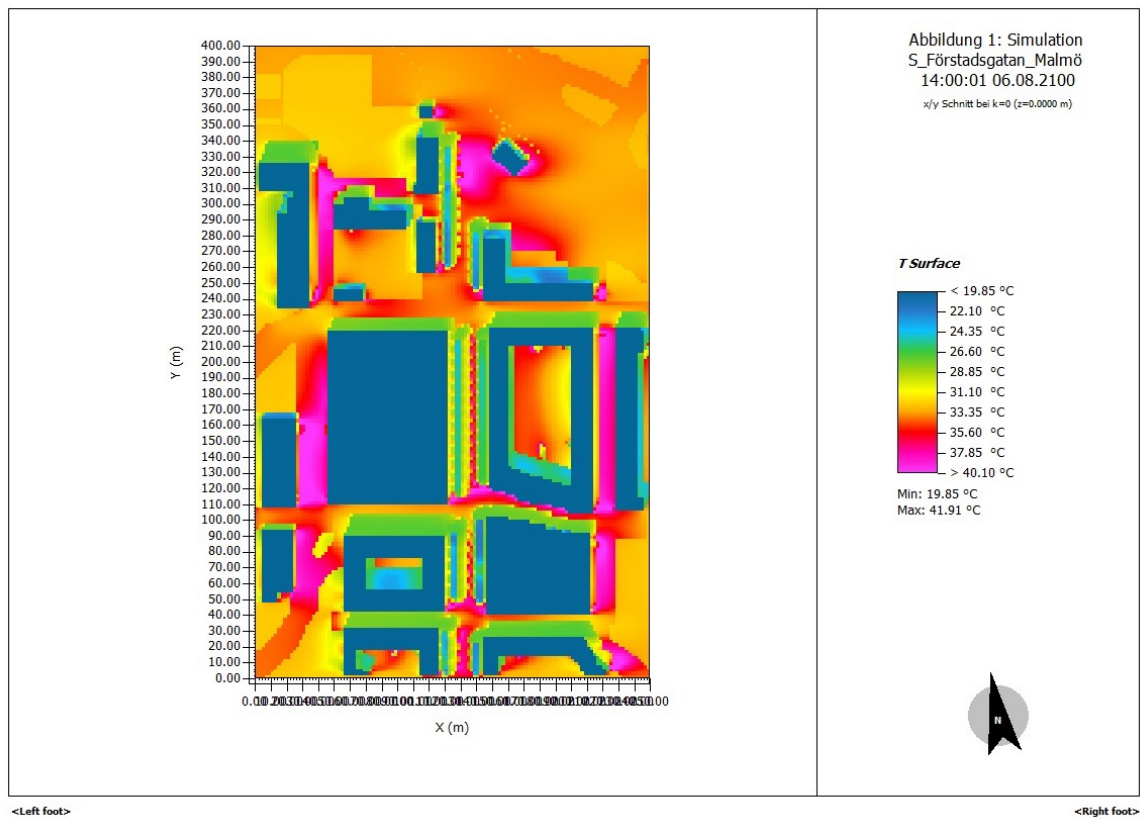
A)



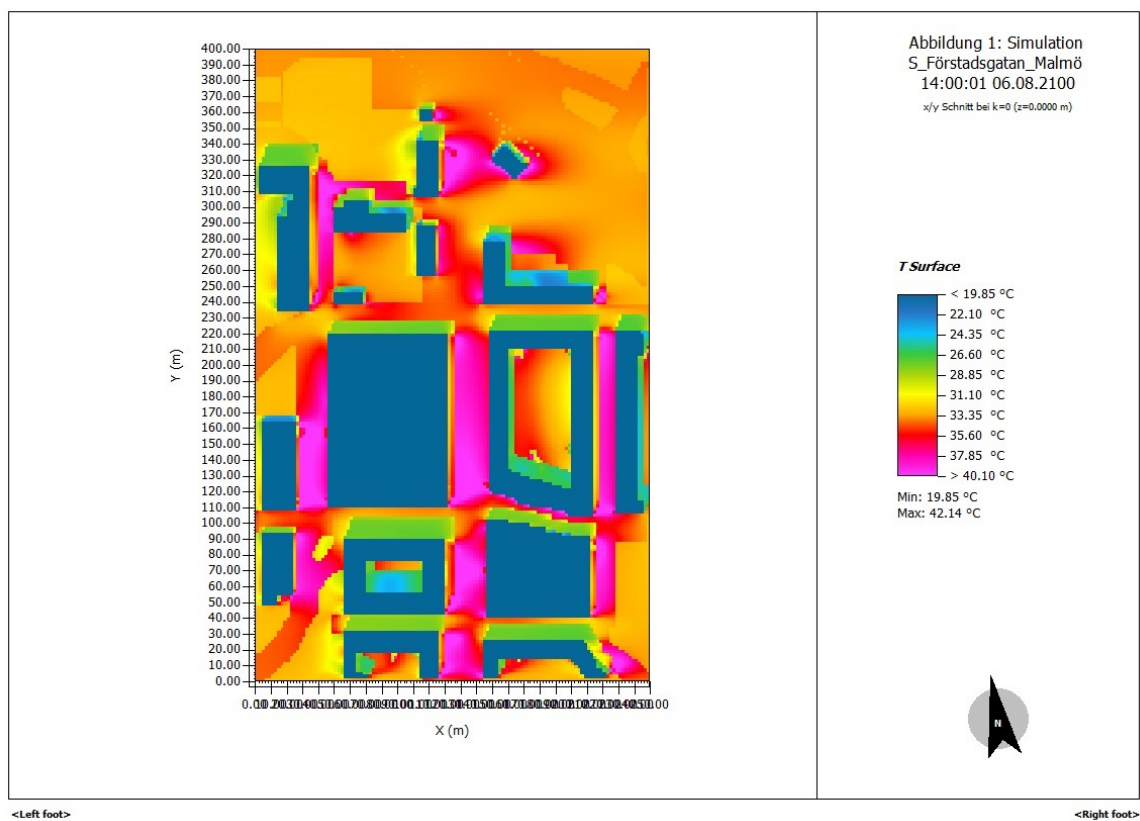
B)



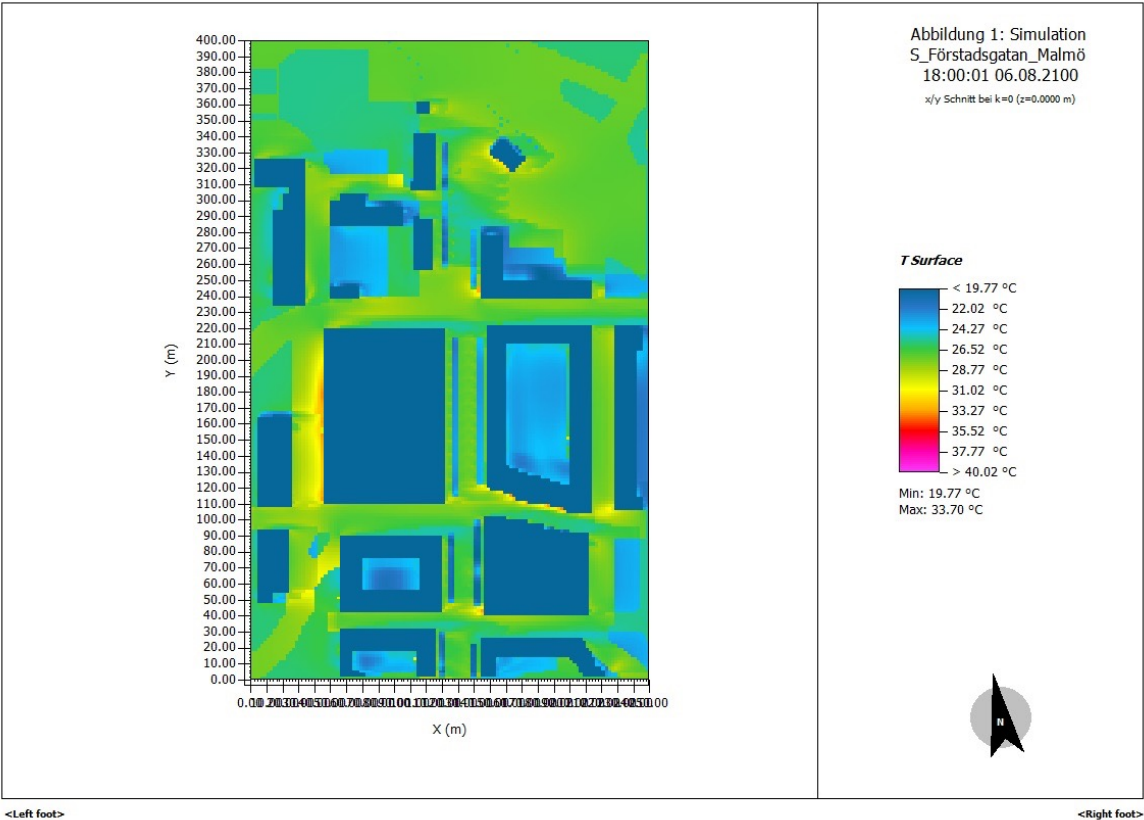
A)



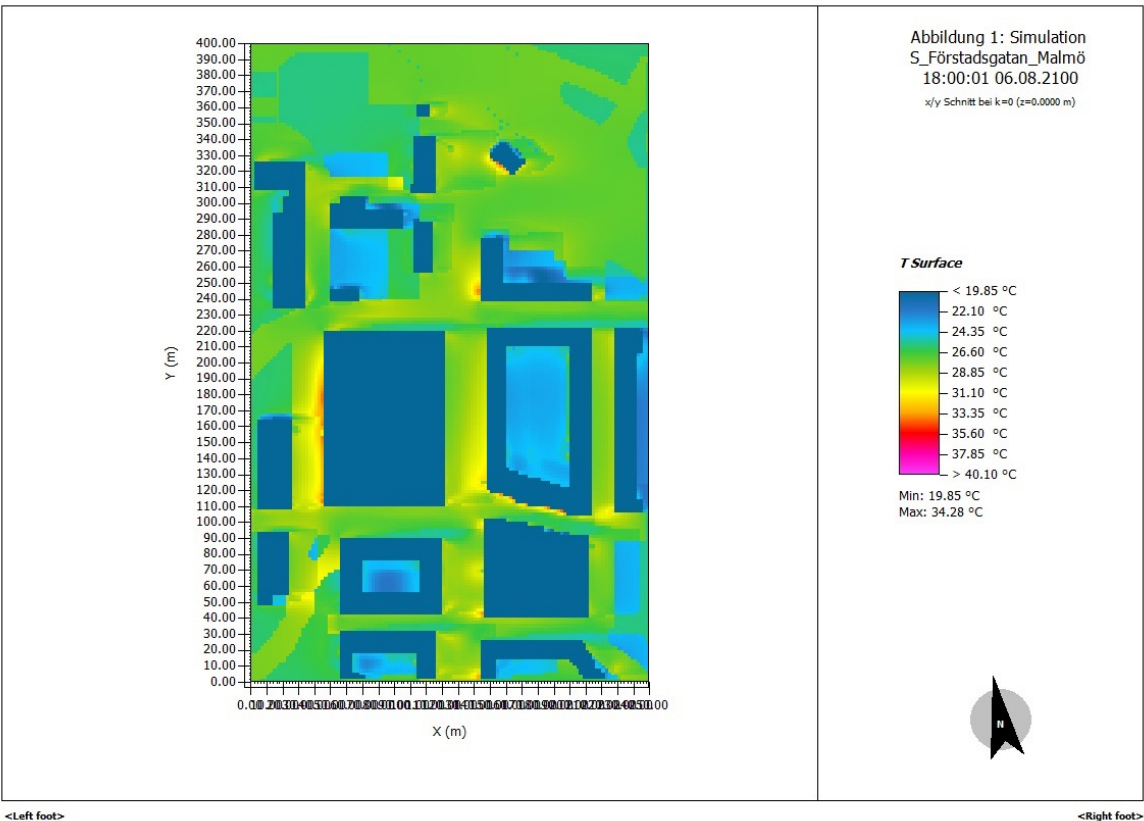
B)



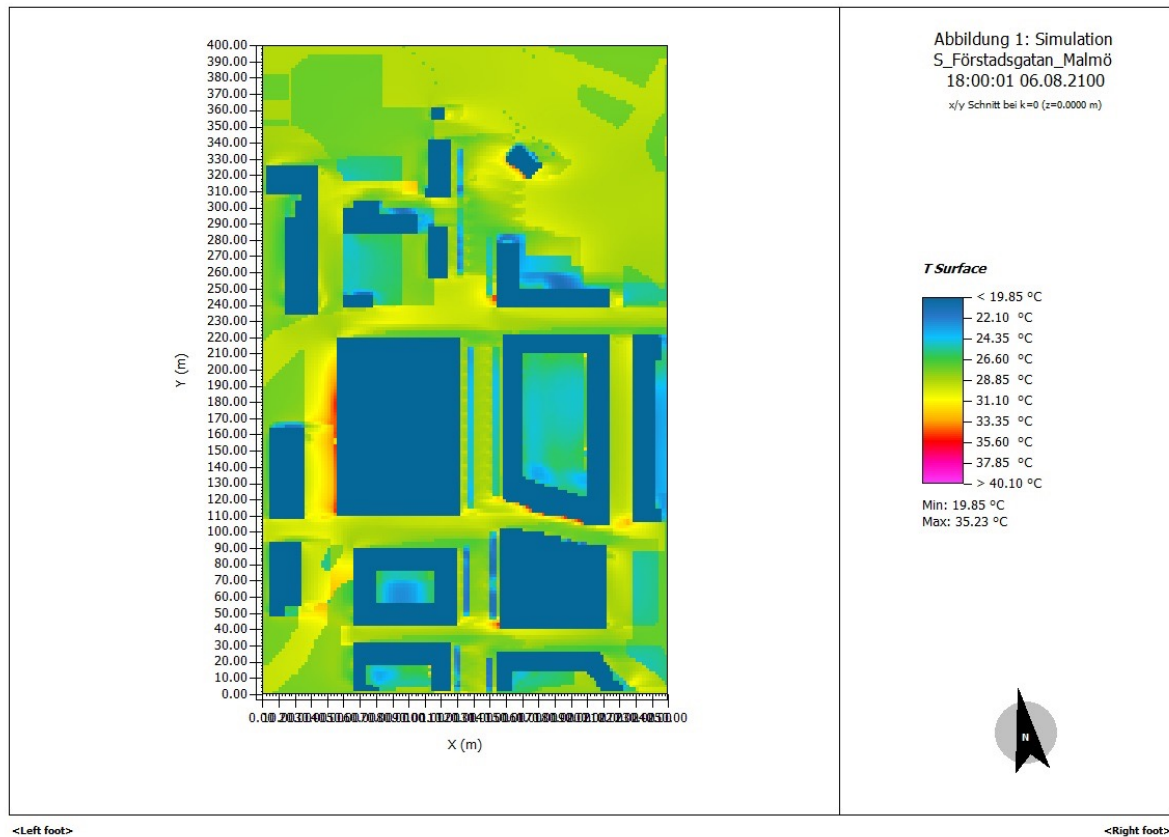
A)



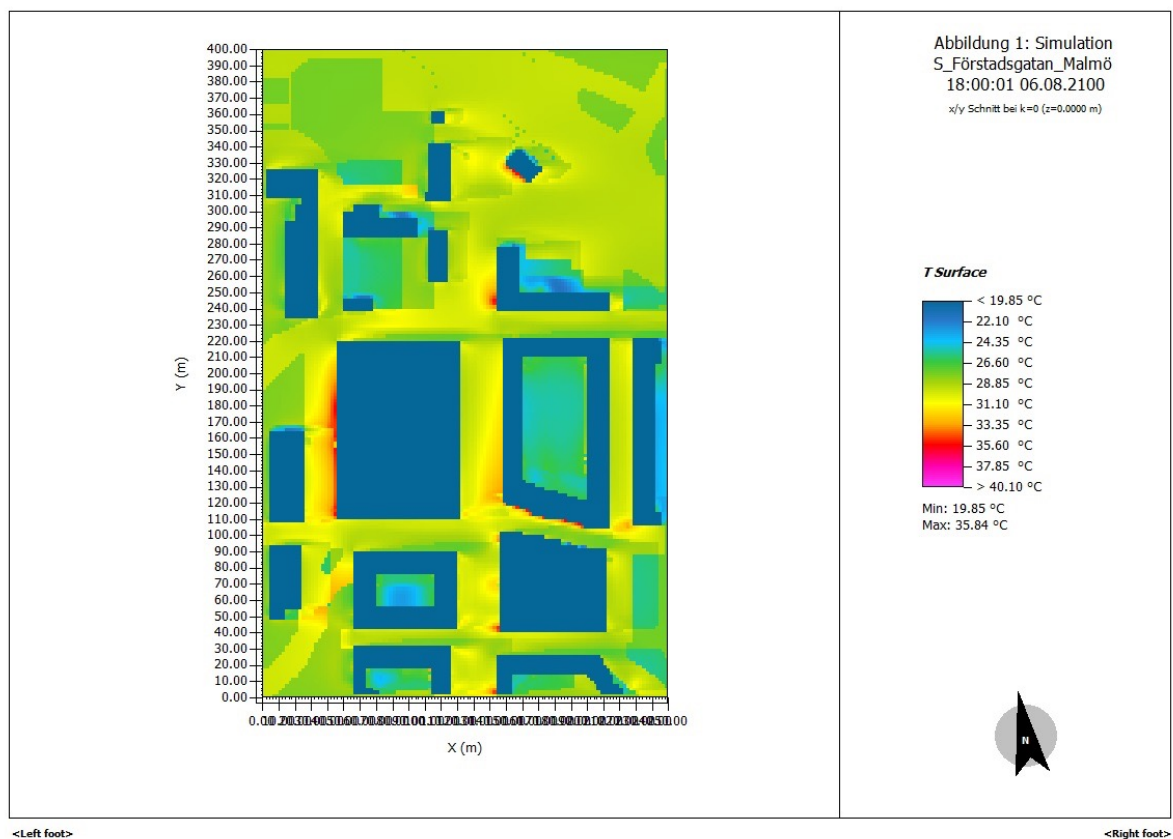
B)



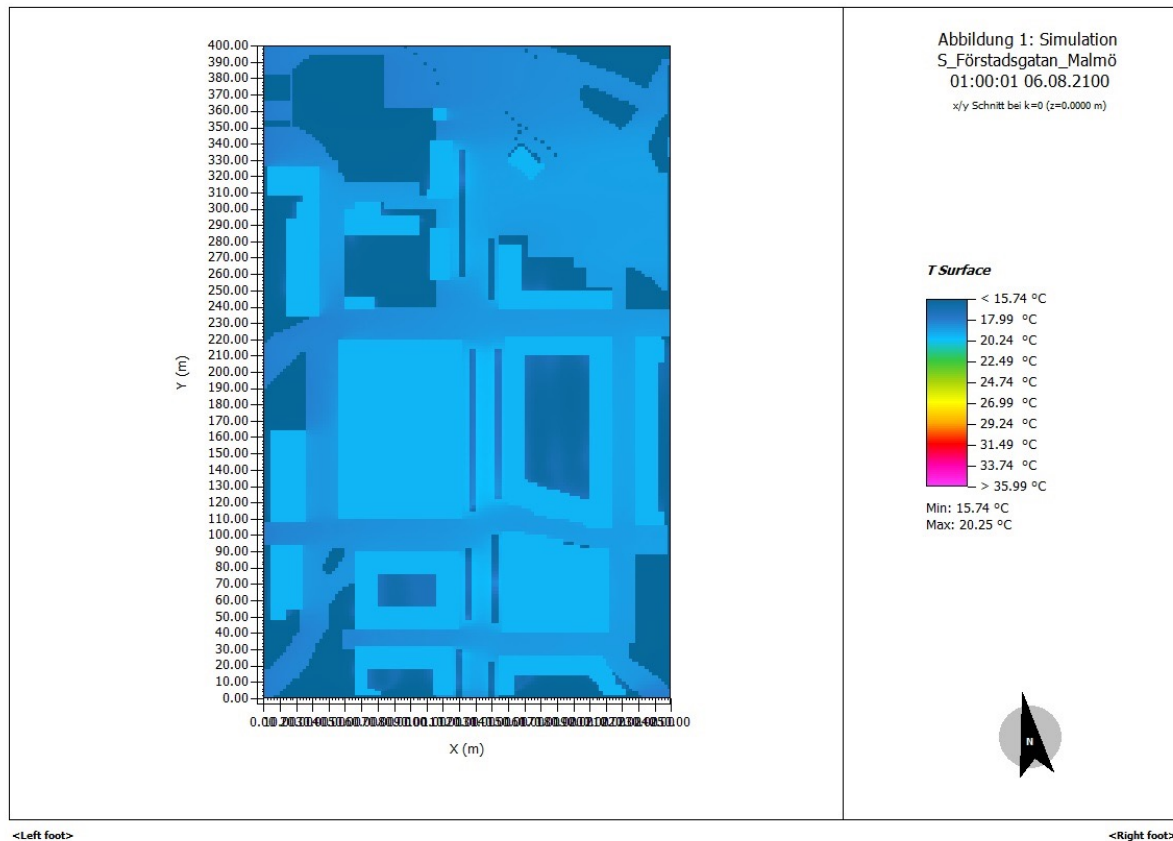
A)



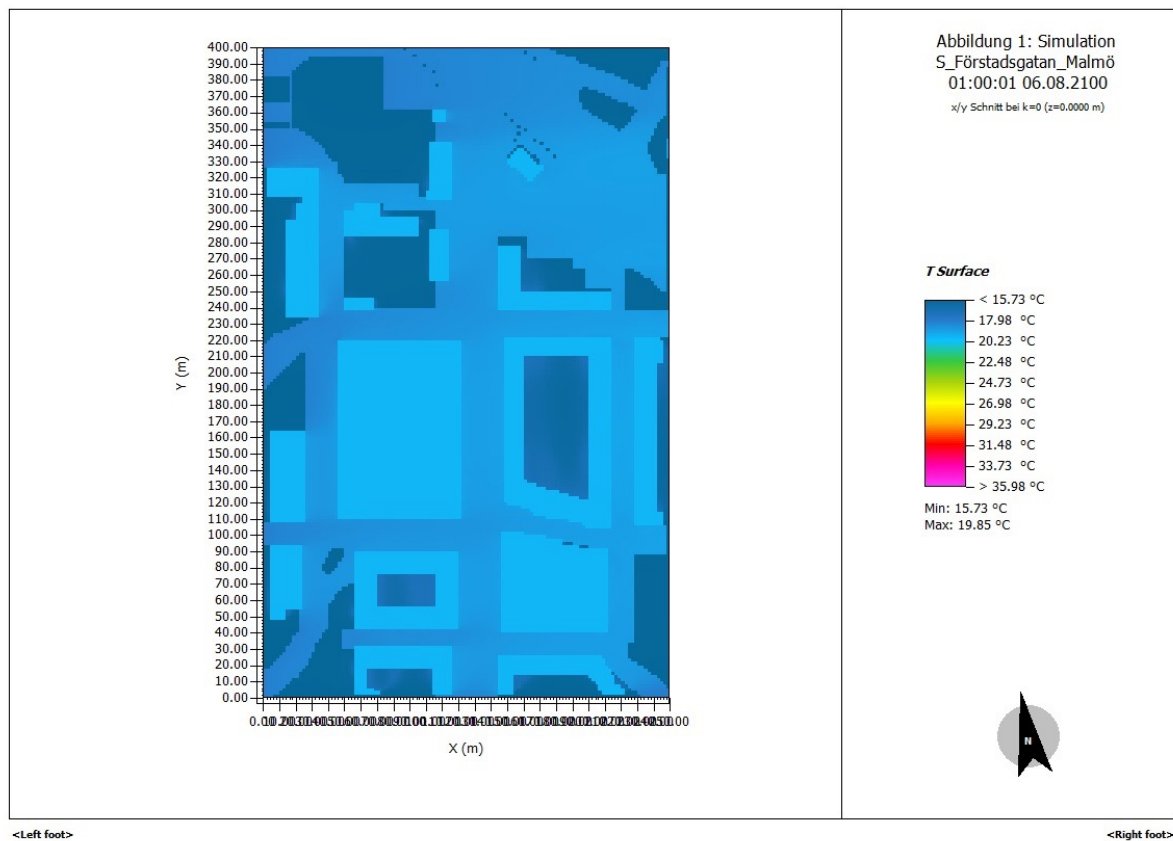
B)



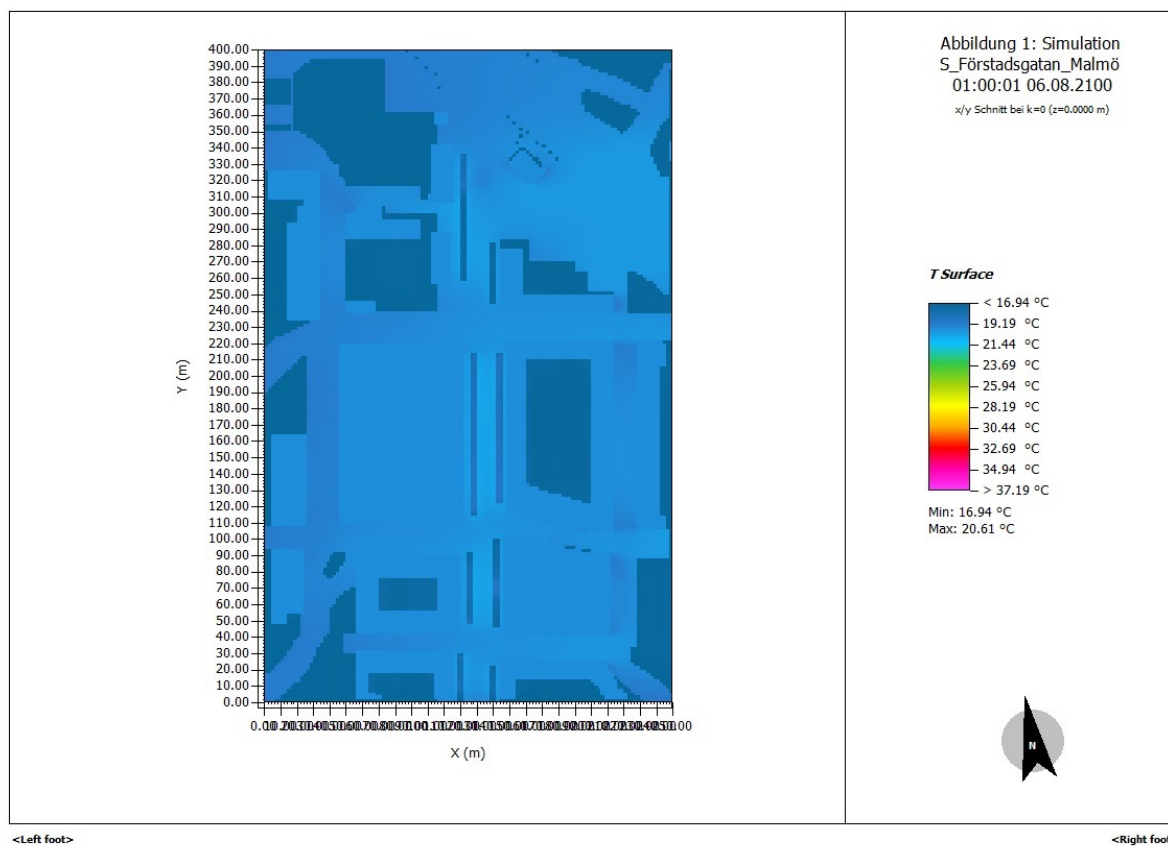
A)



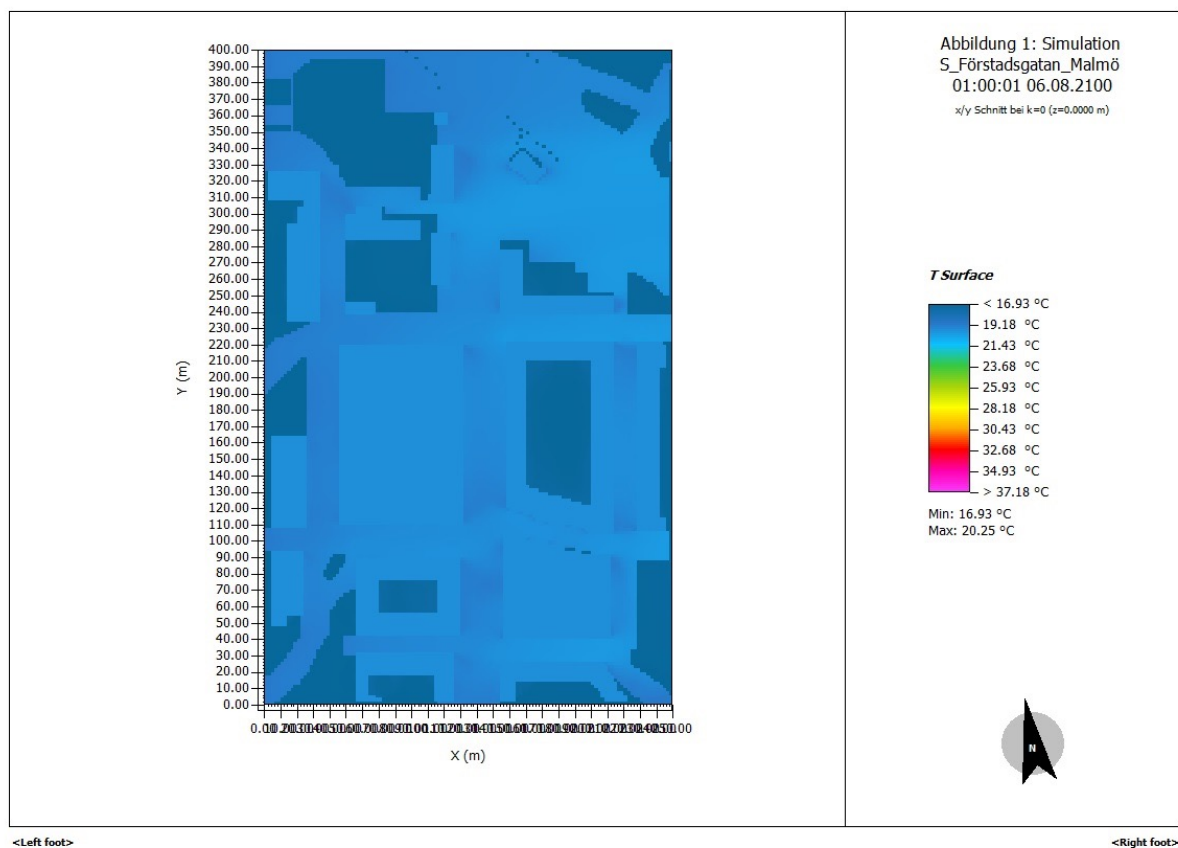
B)



A)

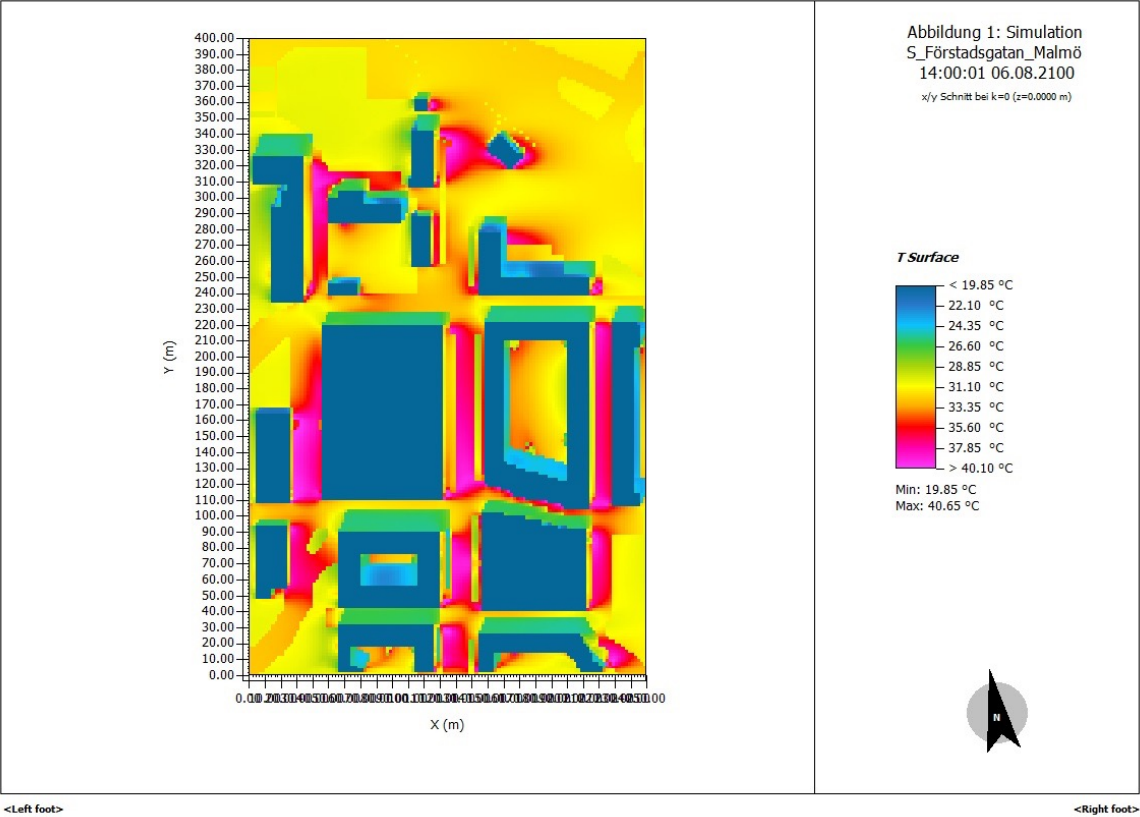


B)

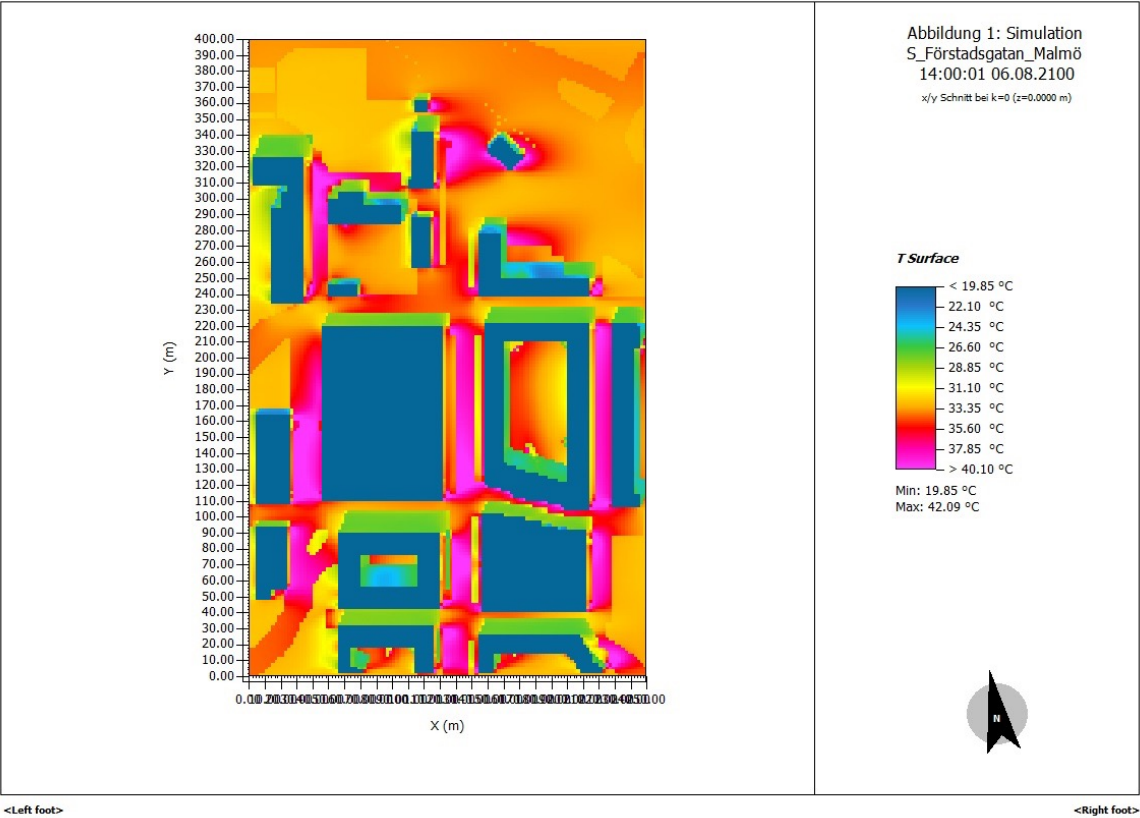


YTTEMPERATUR VÄXTBÄDDAR UTAN TRÄD 14:00
A) ÖKAD MEDELTEMPERATUR B) VÄRMEBÖLJA

A)



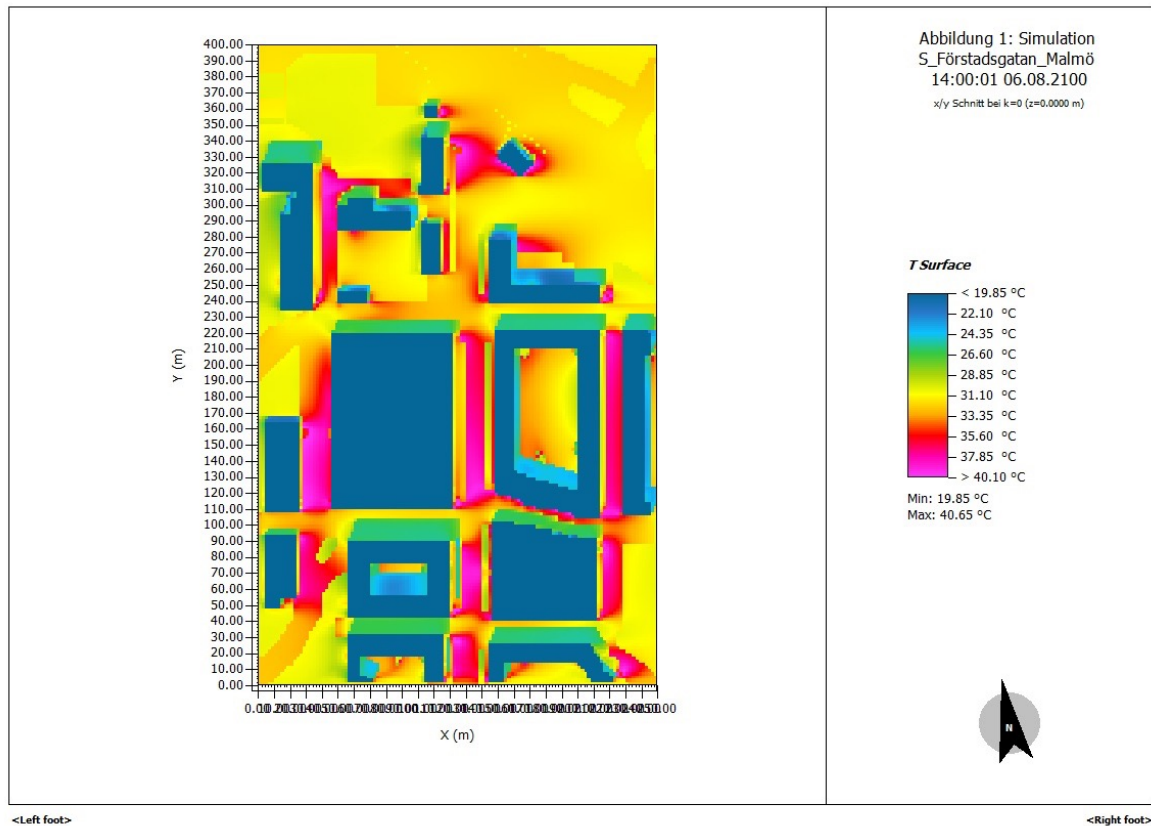
B)



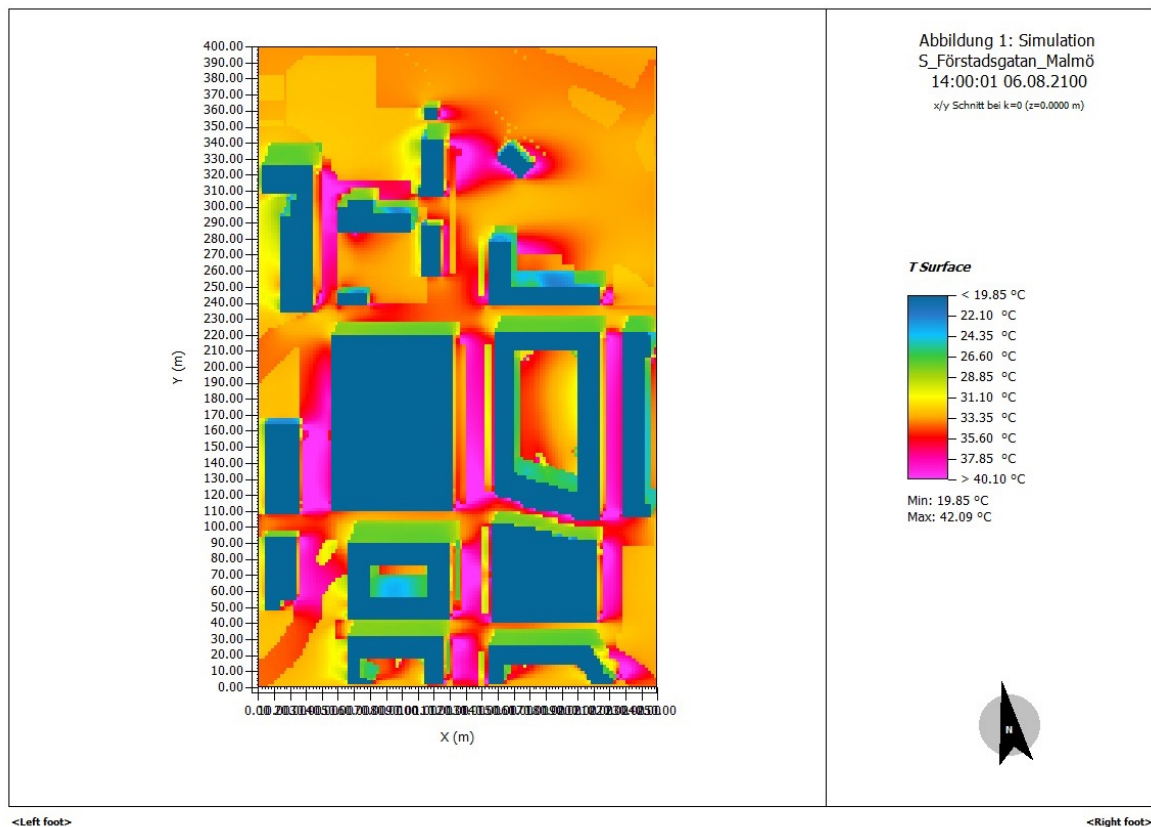
VINDHASTIGHET

A) Med träd B) Utan träd

A)



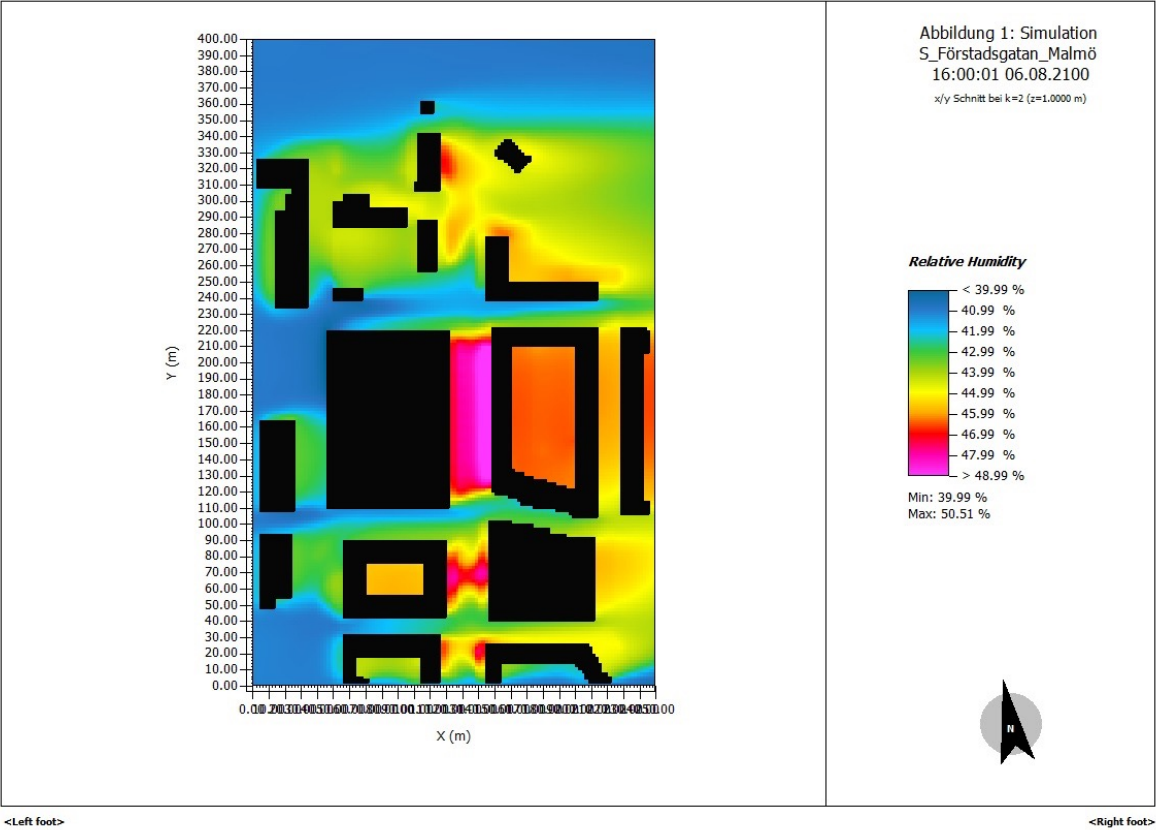
B)



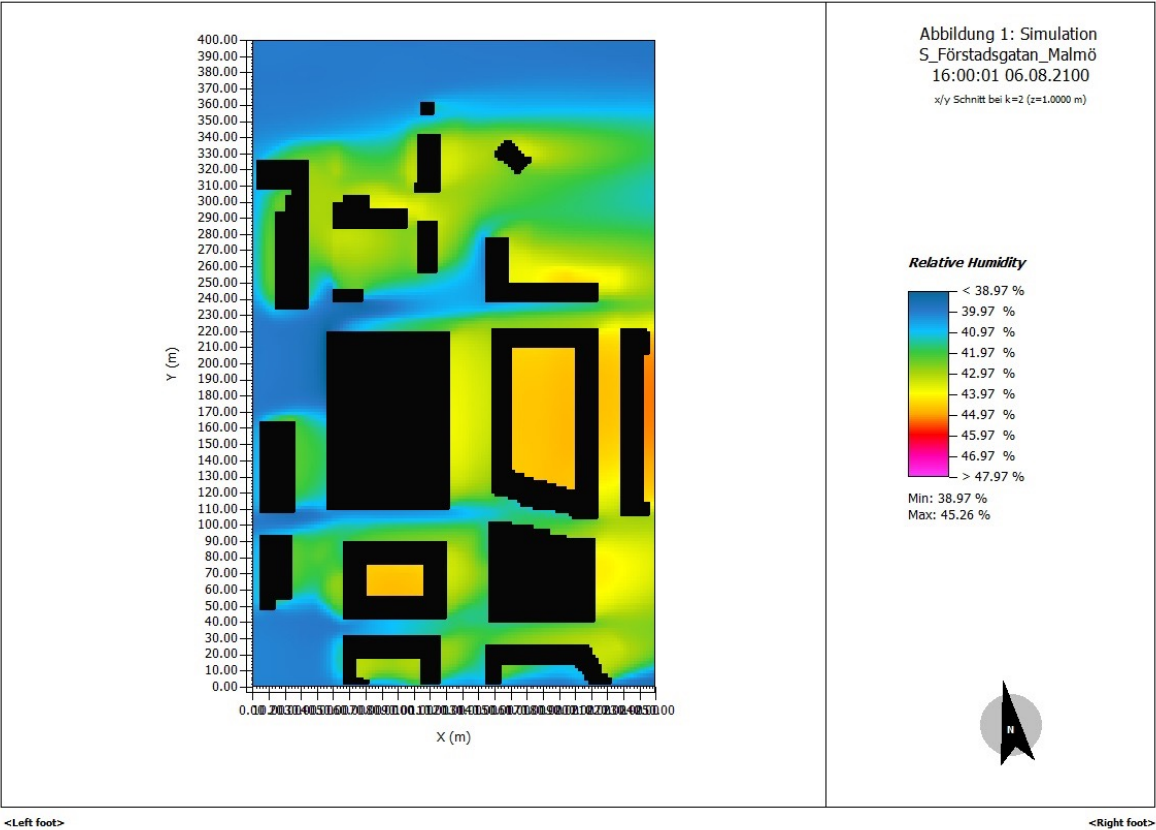
RELATIV LUFTFUKTIGHET ÖKAD MEDELTEMPERATUR 16:00

A) Med träd B) Utan träd

A)



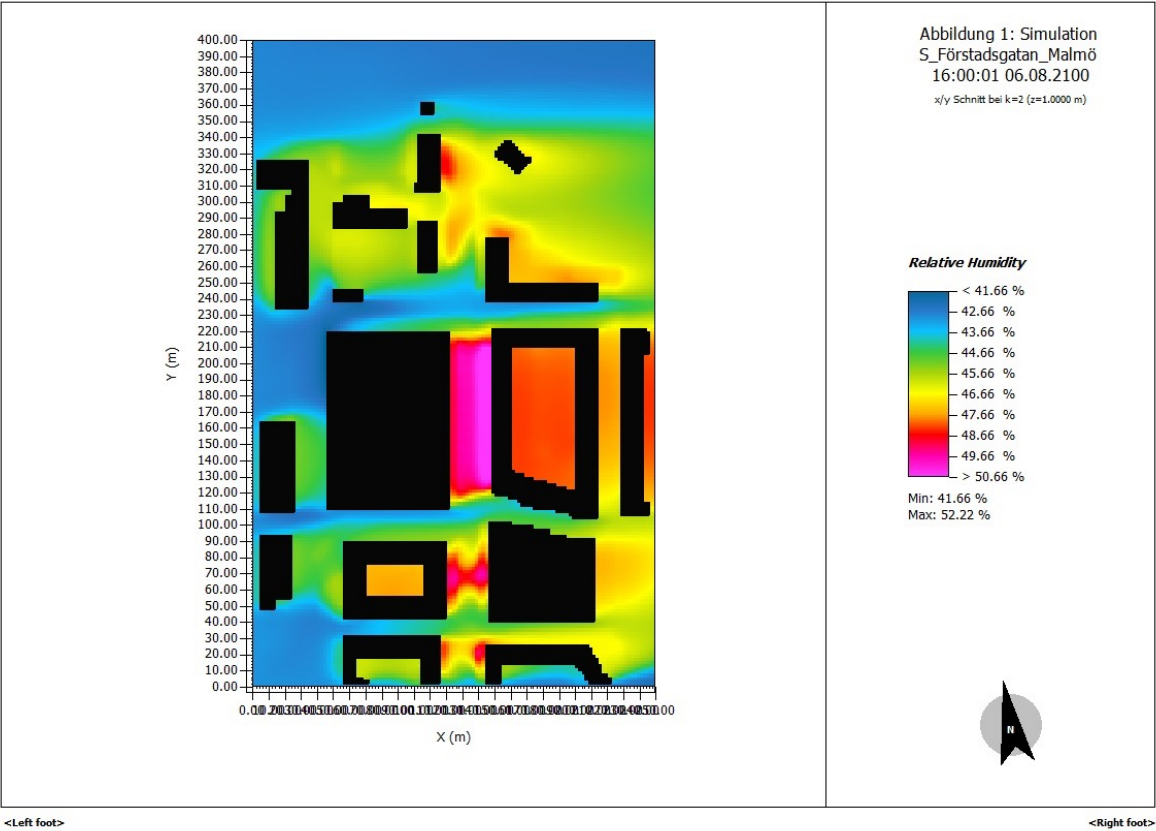
B)



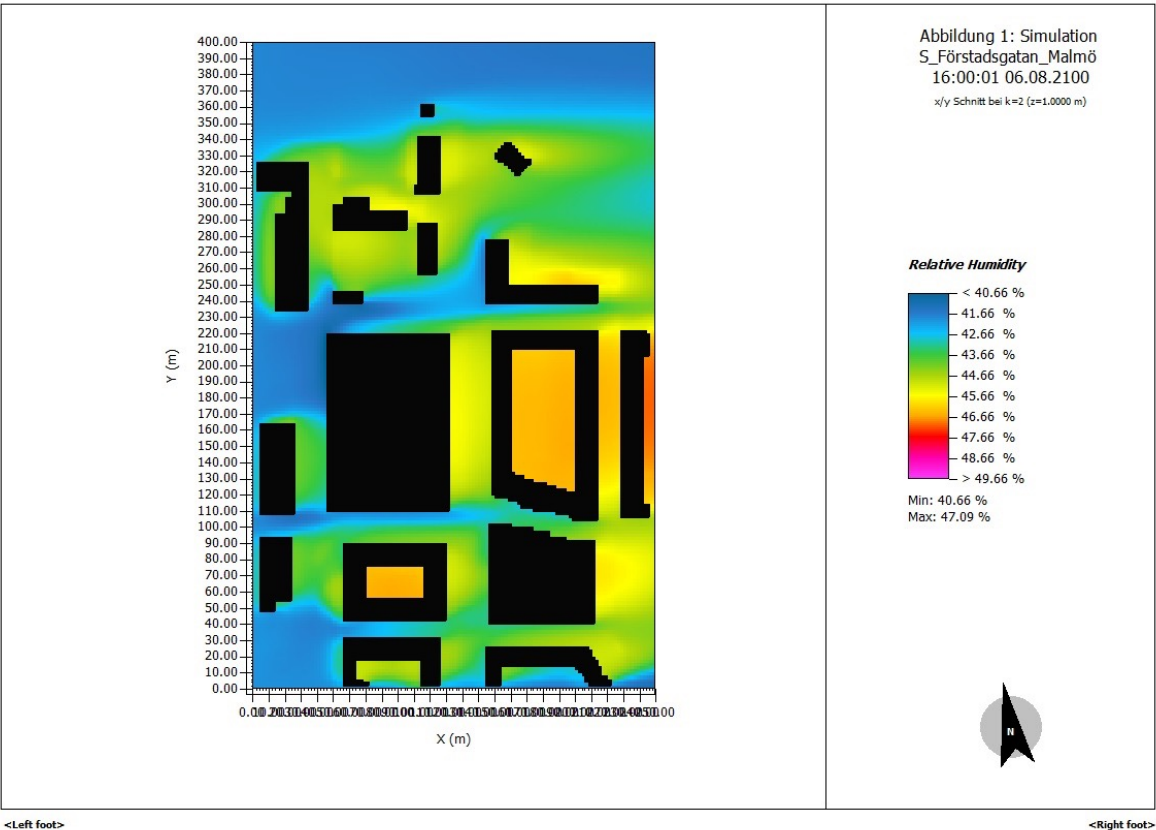
RELATIV LUFTFUKTIGHET VÄRMEBÖLJA 16:00

A) Med träd B) Utan träd

A)



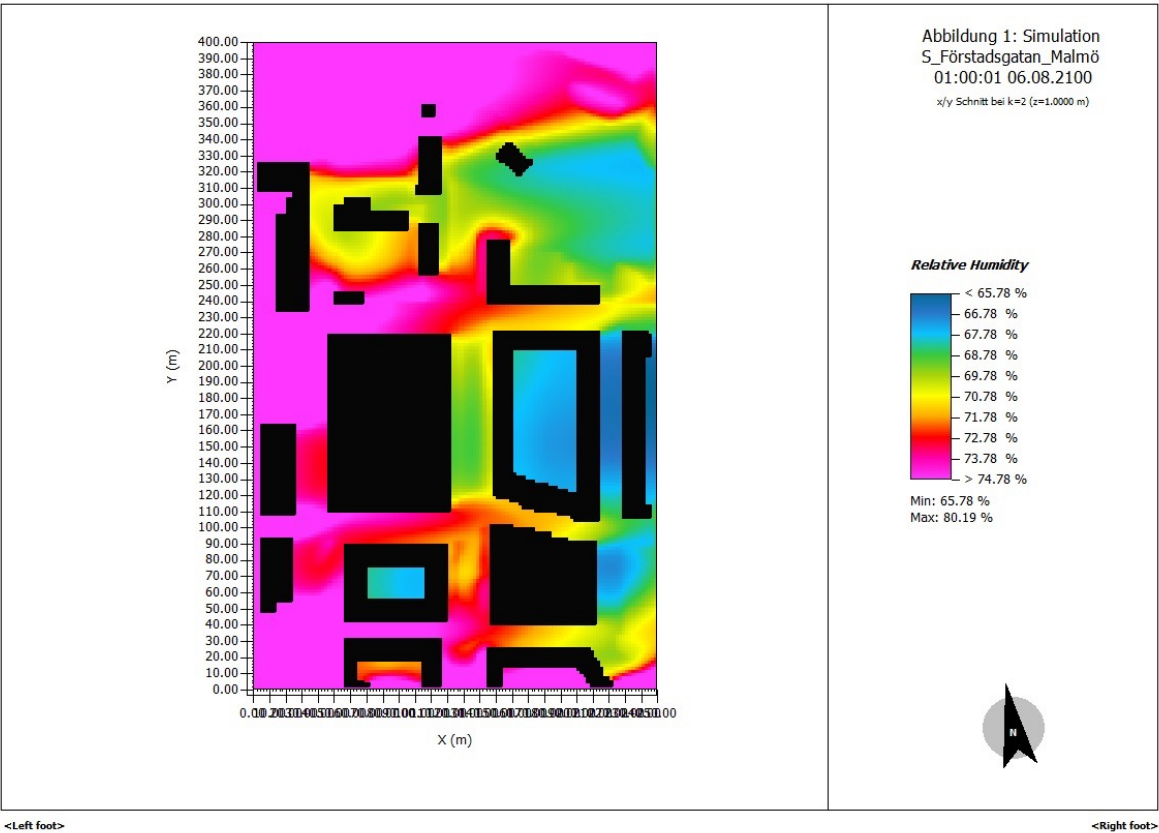
B)



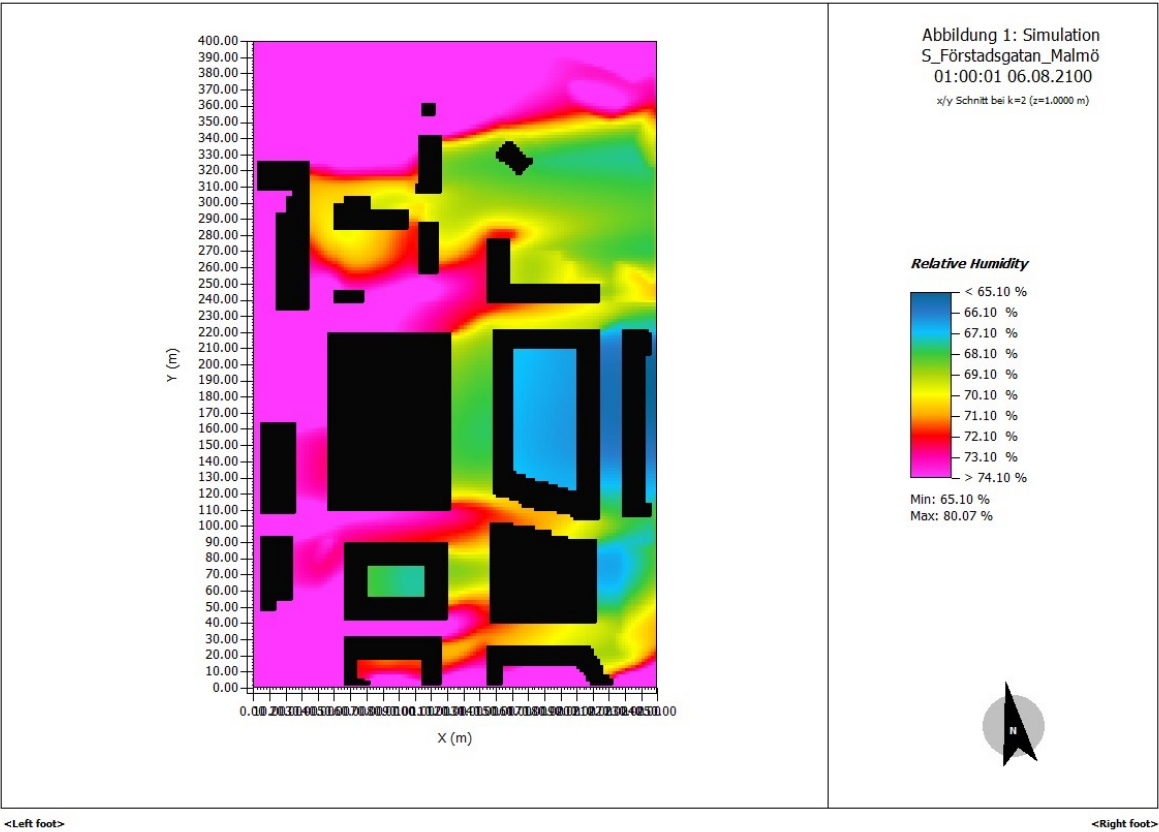
RELATIV LUFTFUKTIGHET ÖKAD MEDELTEMPERATUR 01:00

A) Med träd B) Utan träd

A)



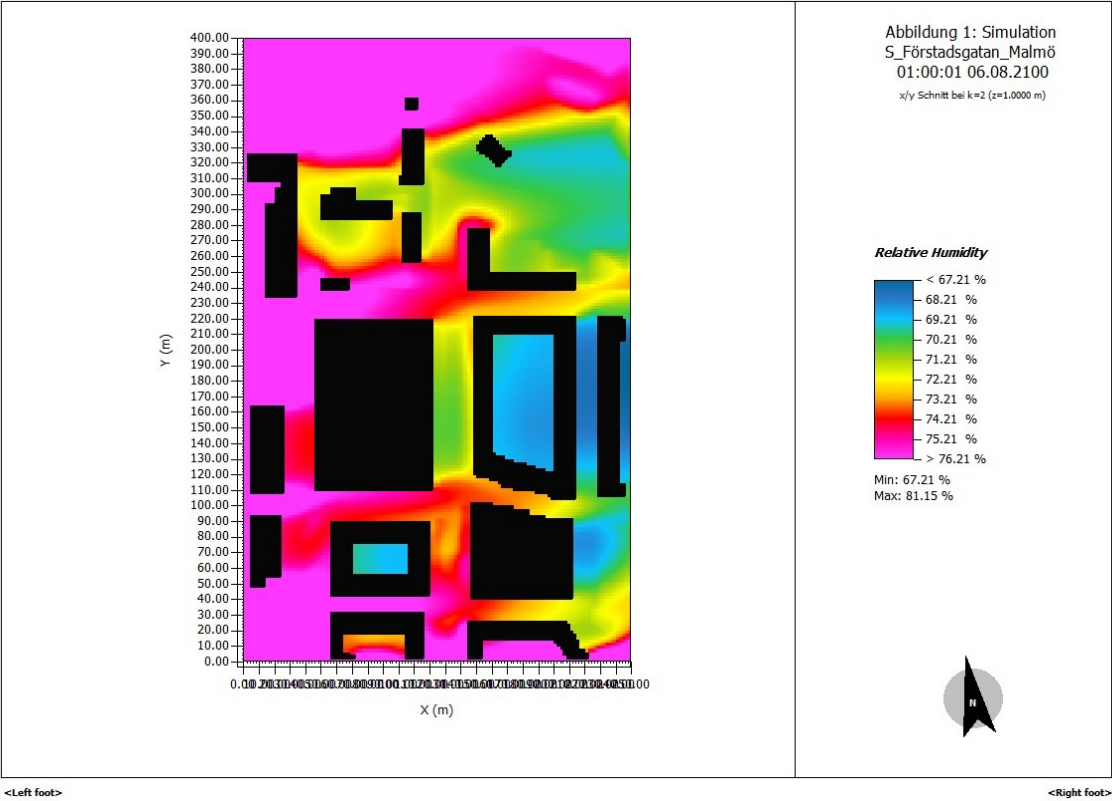
B)



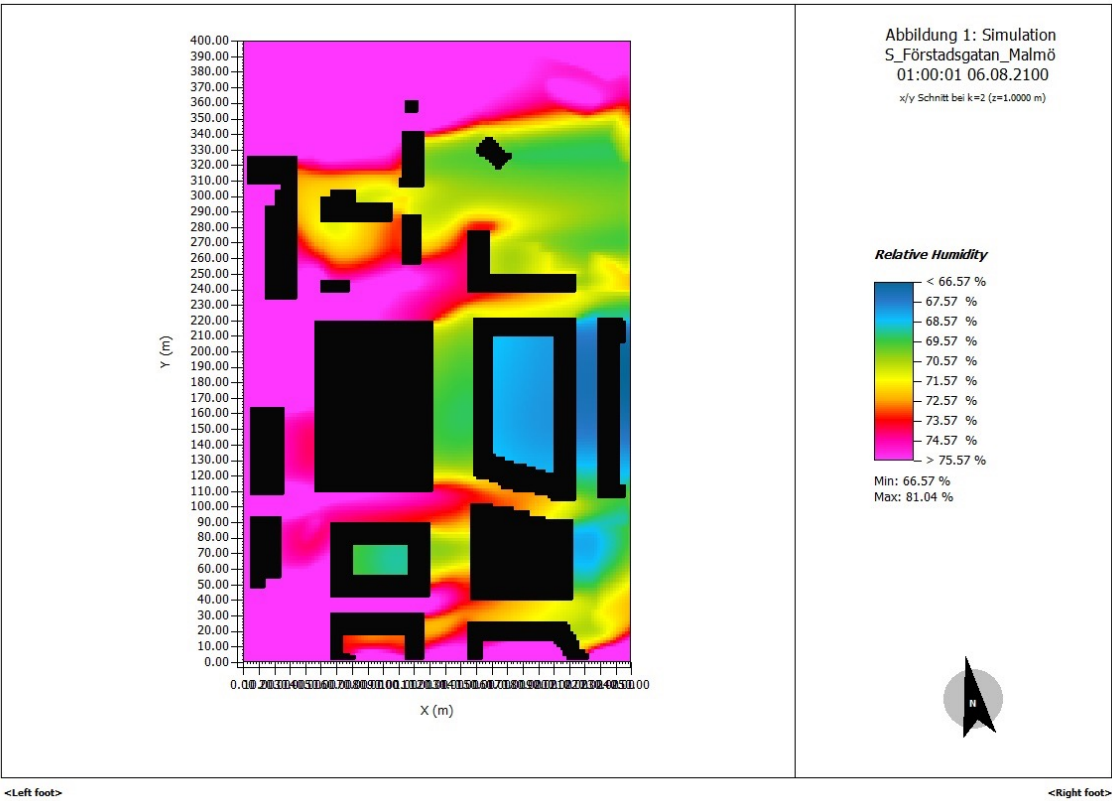
RELATIV LUFTFUKTIGHET VÄRMEBÖLJA 01:00

A) Med träd B) Utan träd

A)



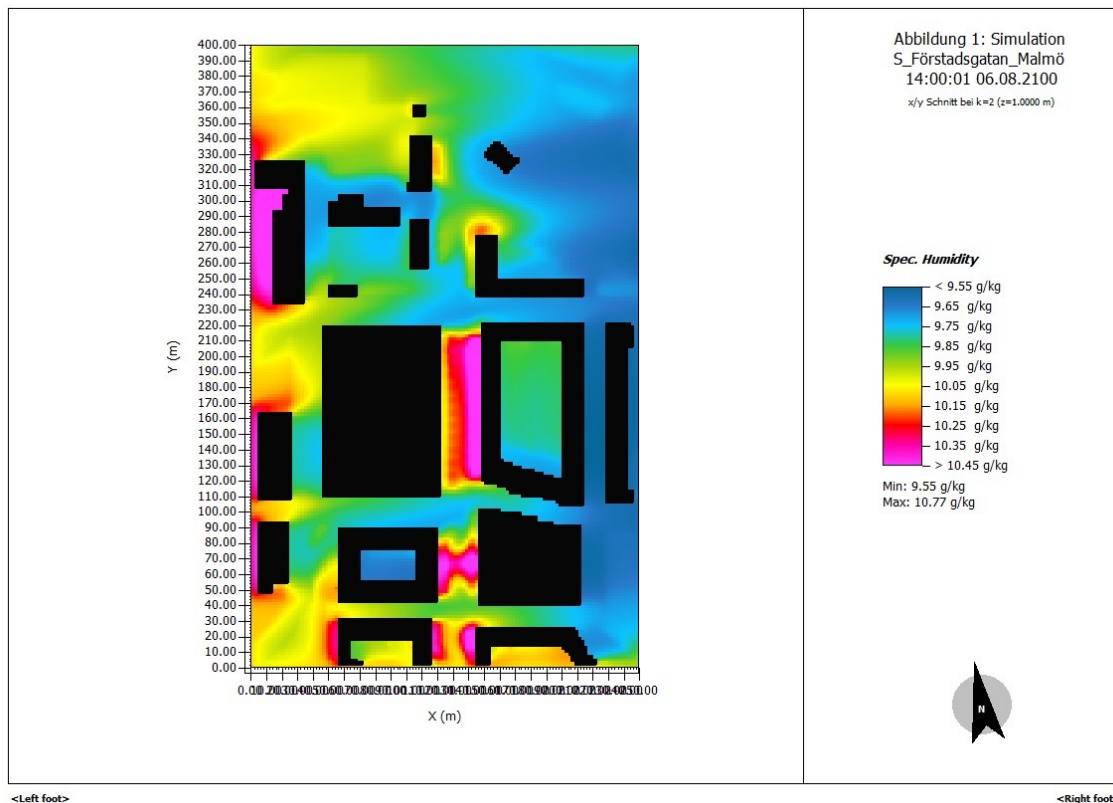
B)



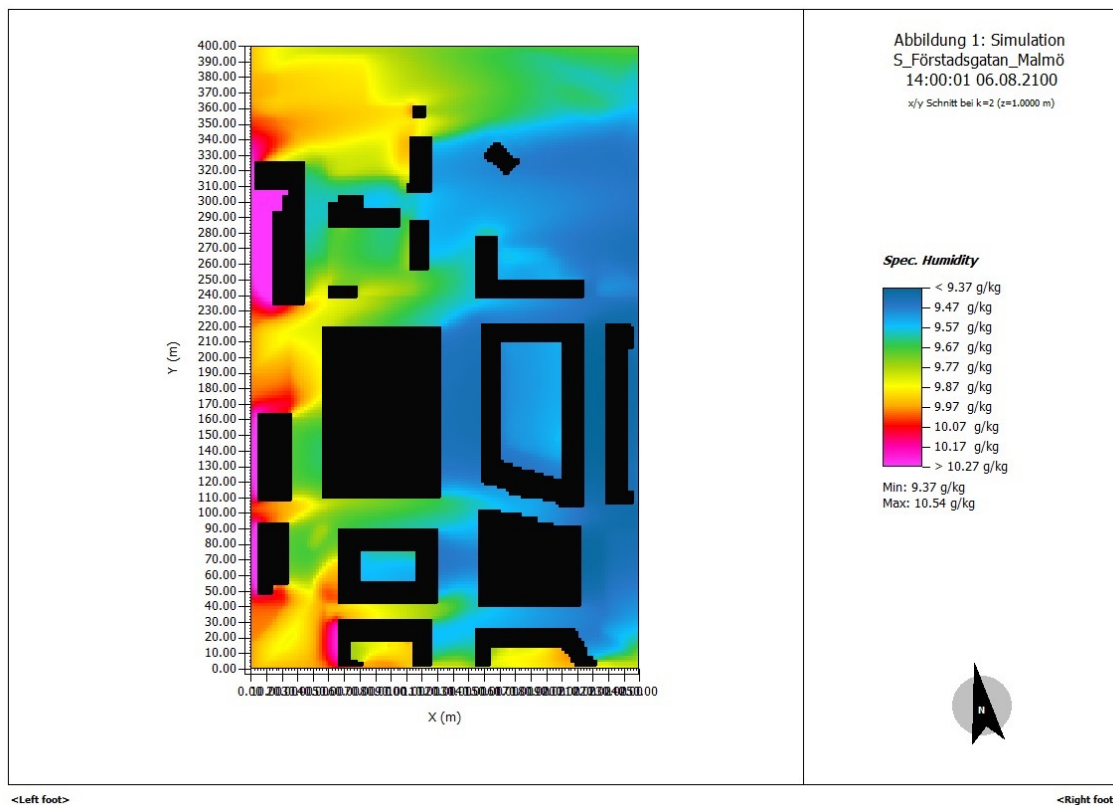
SPECIFIK LUFTFUKTIGHET ÖKAD MEDELTEMPERATUR 14:00

A) Med träd B) Utan träd

A)



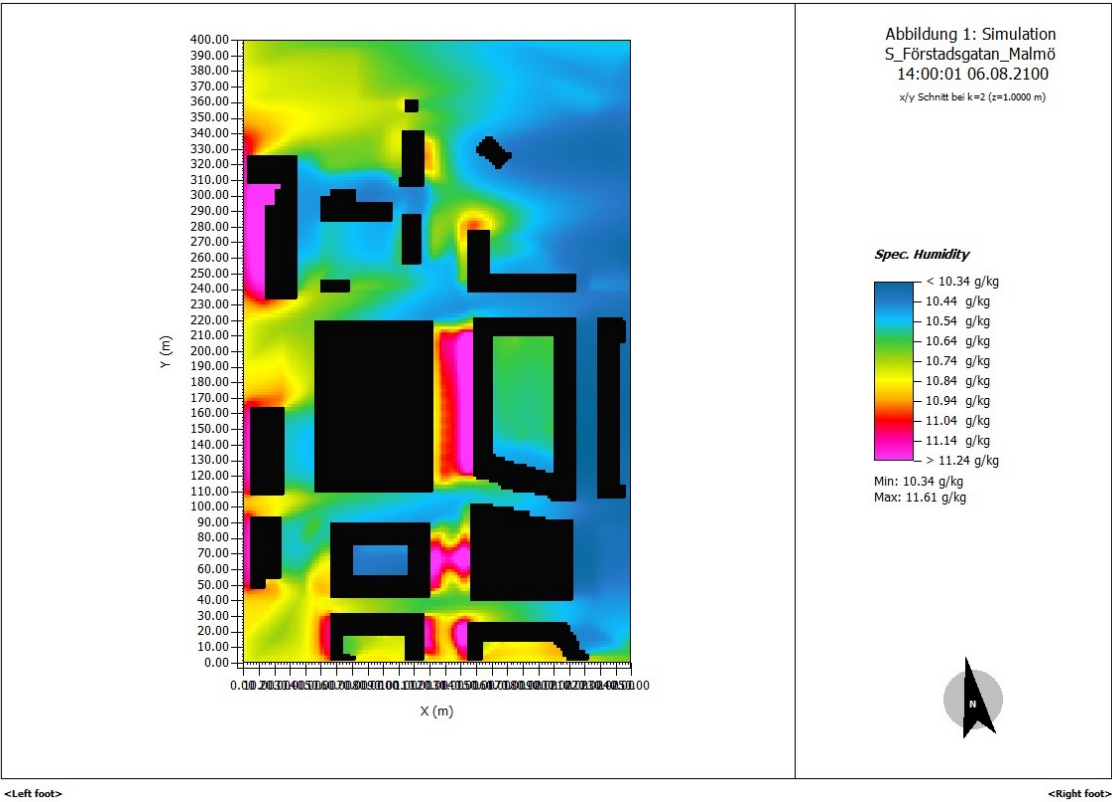
B)



SPECIFIK LUFTFUKTIGHET VÄRMEBÖLJA 14:00

A) Med träd B) Utan träd

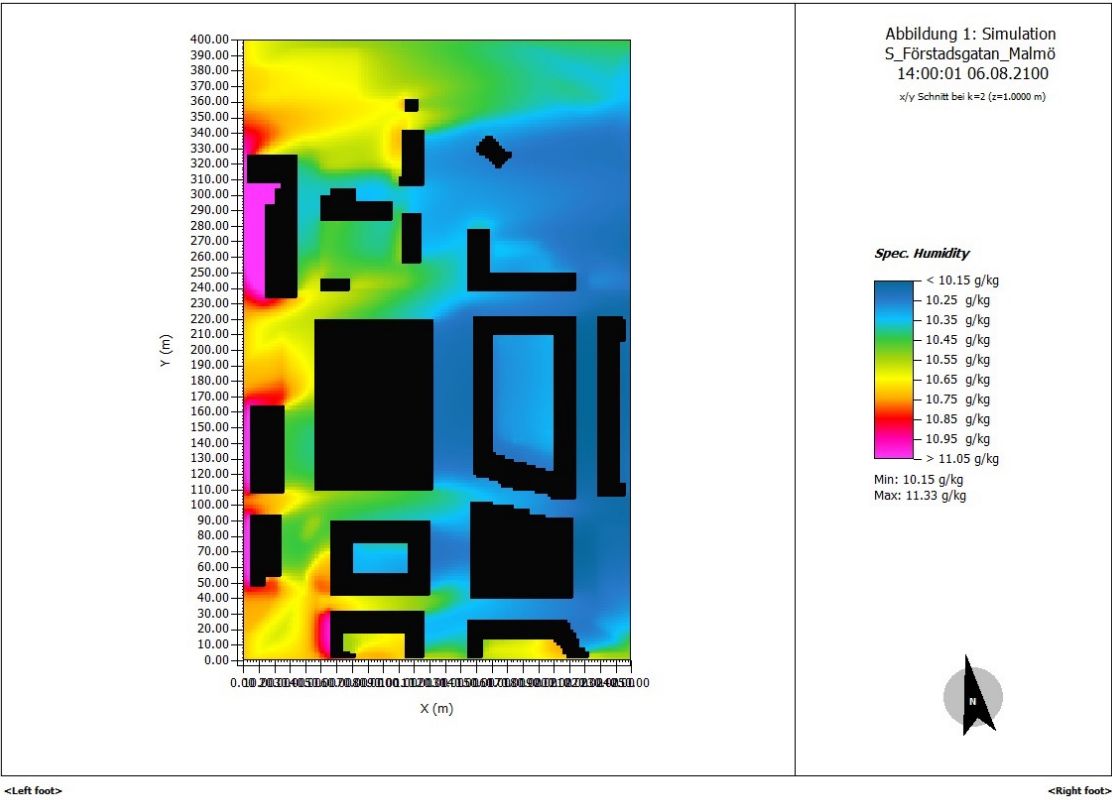
A)



<Left foot>

<Right foot>

B)



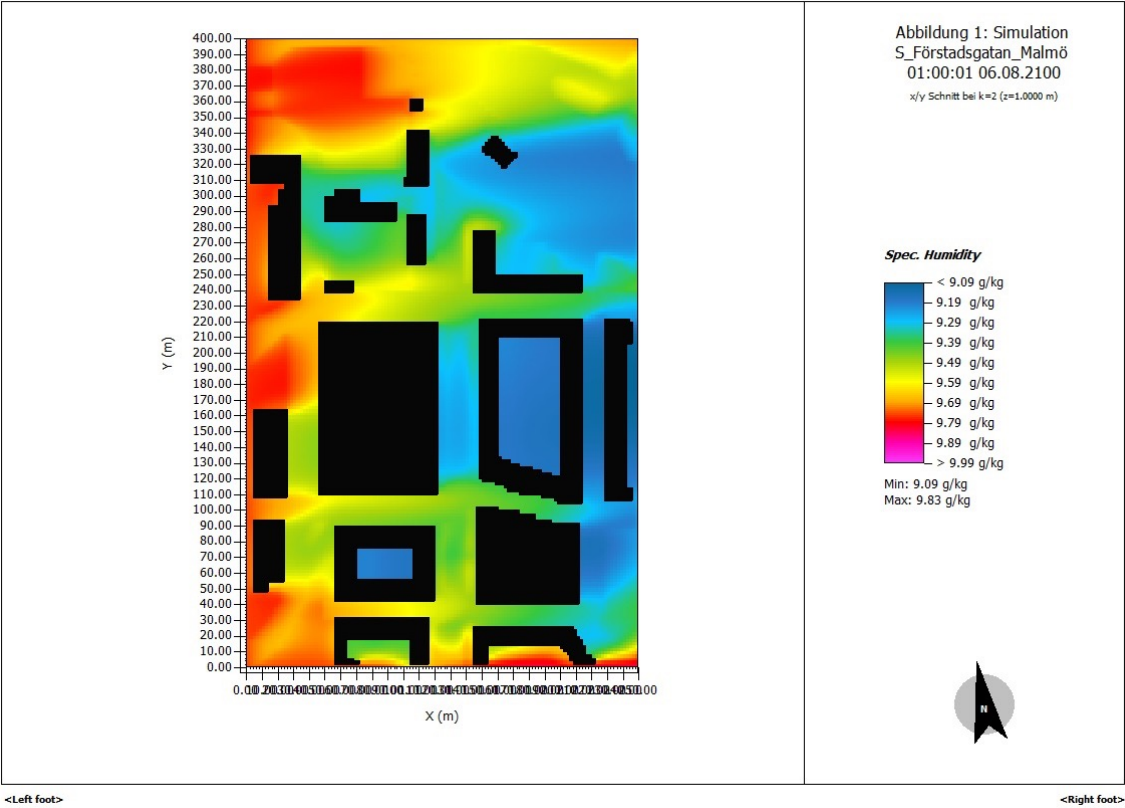
<Left foot>

<Right foot>

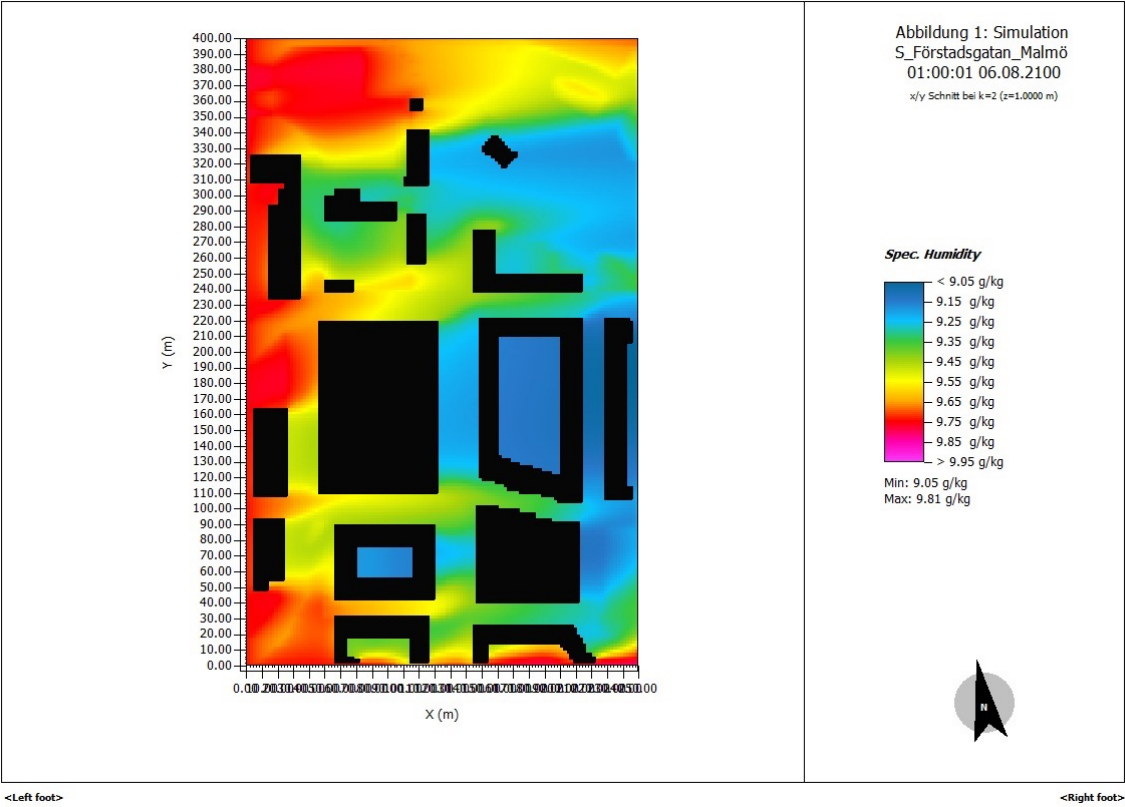
SPECIFIK LUFTFUKTIGHET ÖKAD MEDELTEMPERATUR 01:00

A) Med träd B) Utan träd

A)



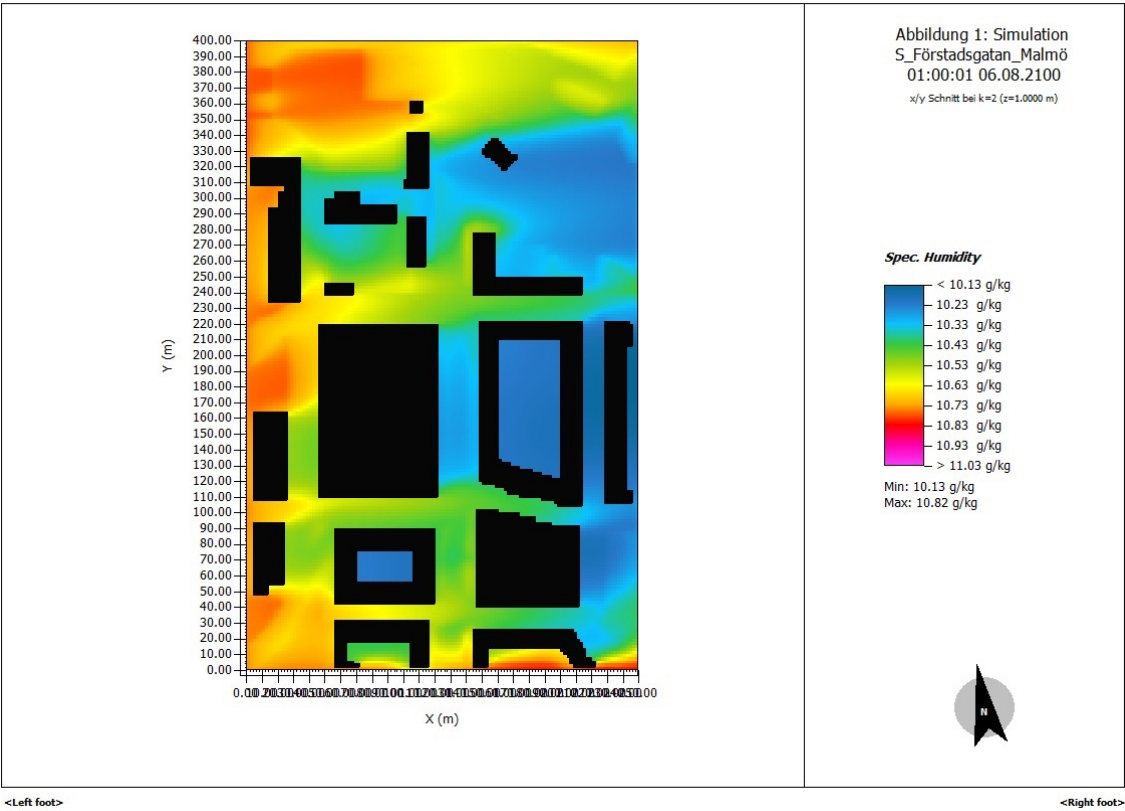
B)



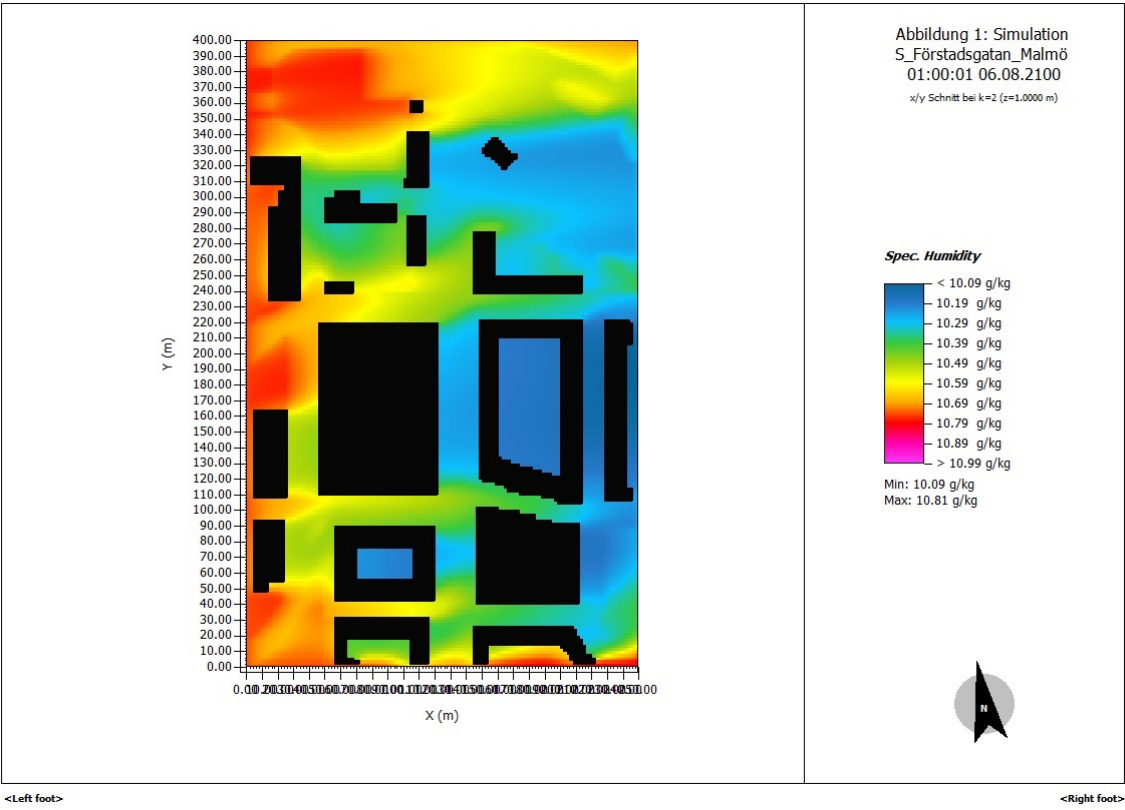
SPECIFIK LUFTFUKTIGHET VÄRMEBÖLJA 01:00

A) Med träd B) Utan träd

A)



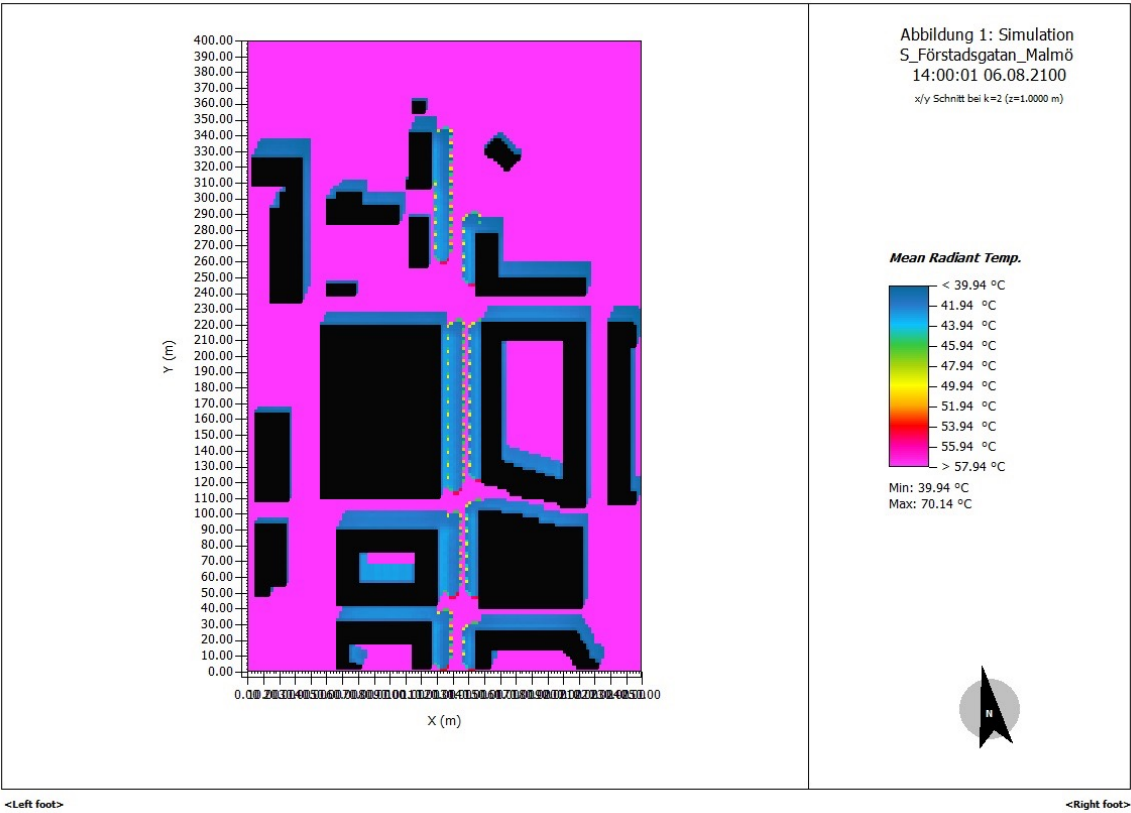
B)



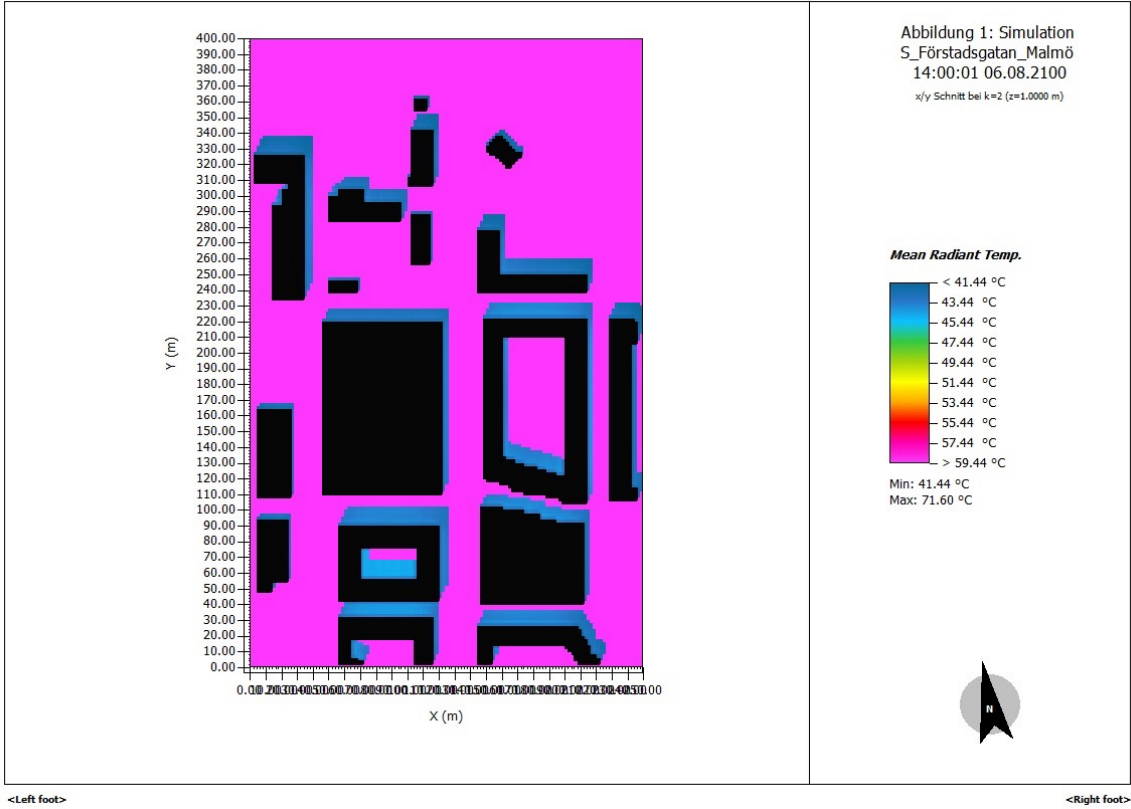
MEAN RADIANT TEMPERATURE (MRT) ÖKAD MEDELTEMPERATUR 14:00

A) Med träd B) Utan träd

A)



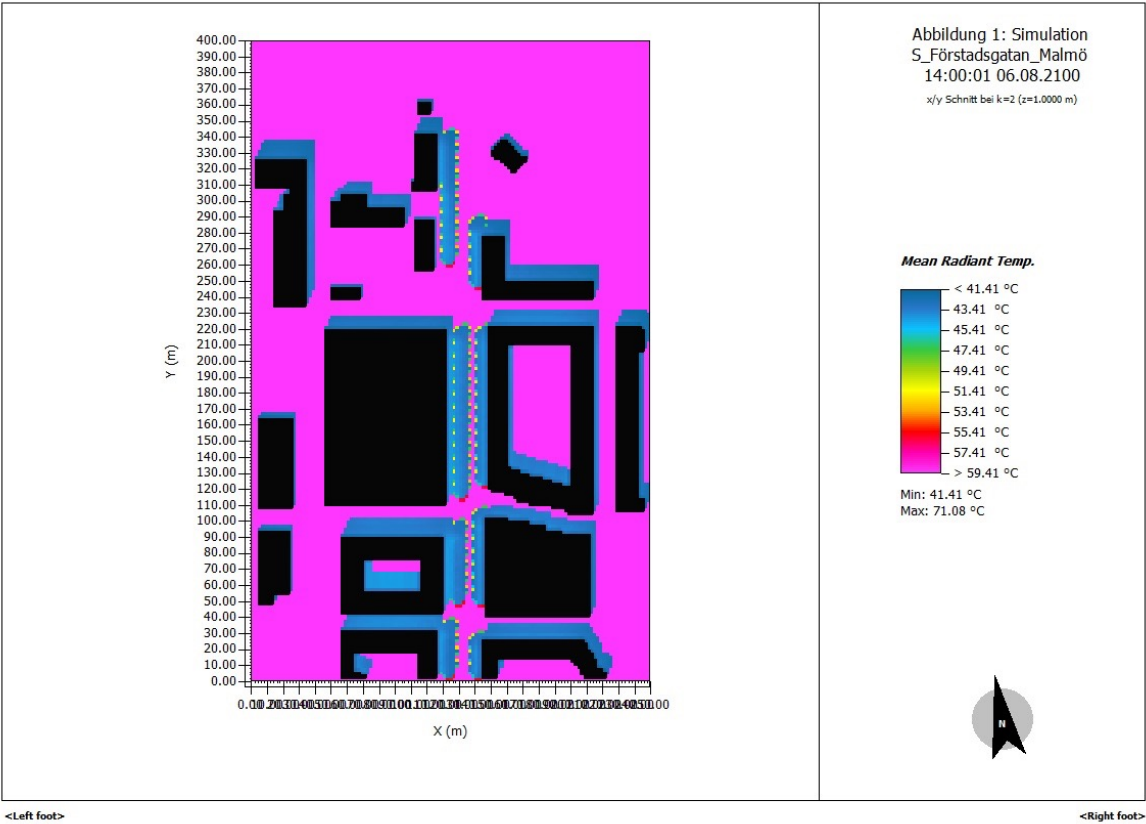
B)



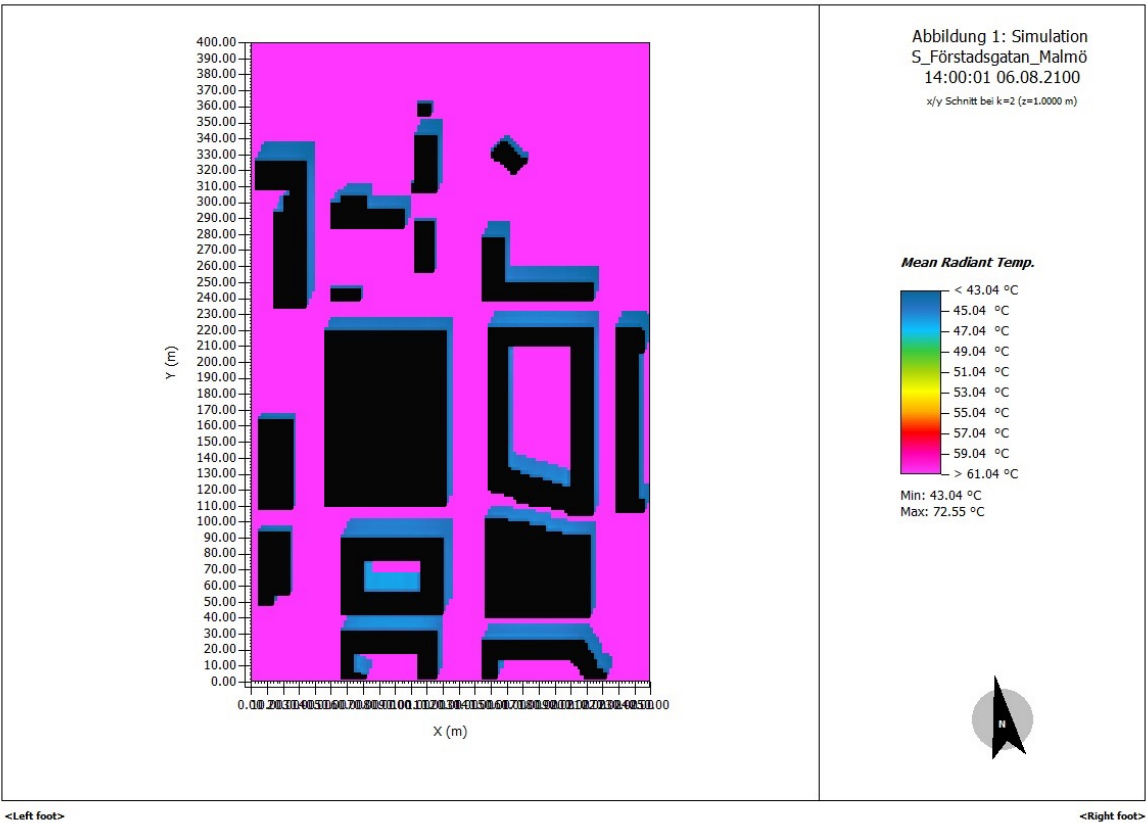
MEAN RADIANT TEMPERATURE (MRT) VÄRMEBÖLJA 14:00

A) Med träd B) Utan träd

A)



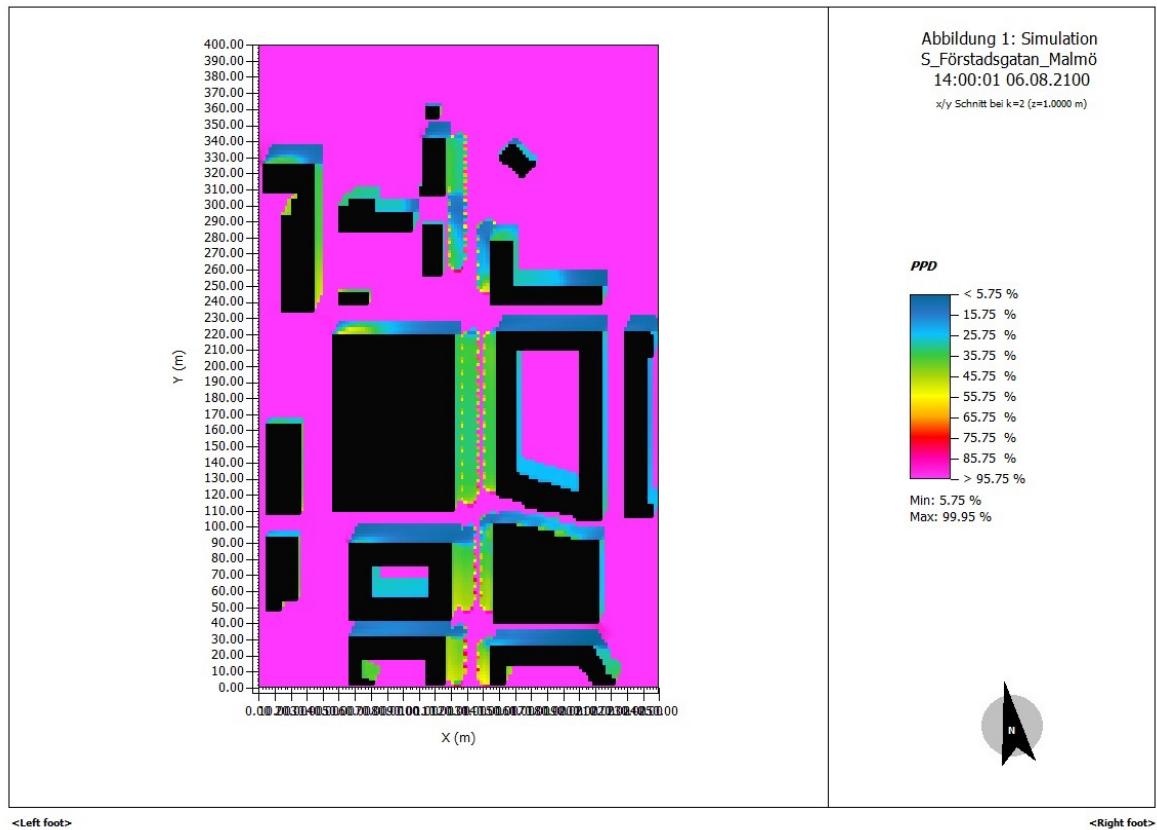
B)



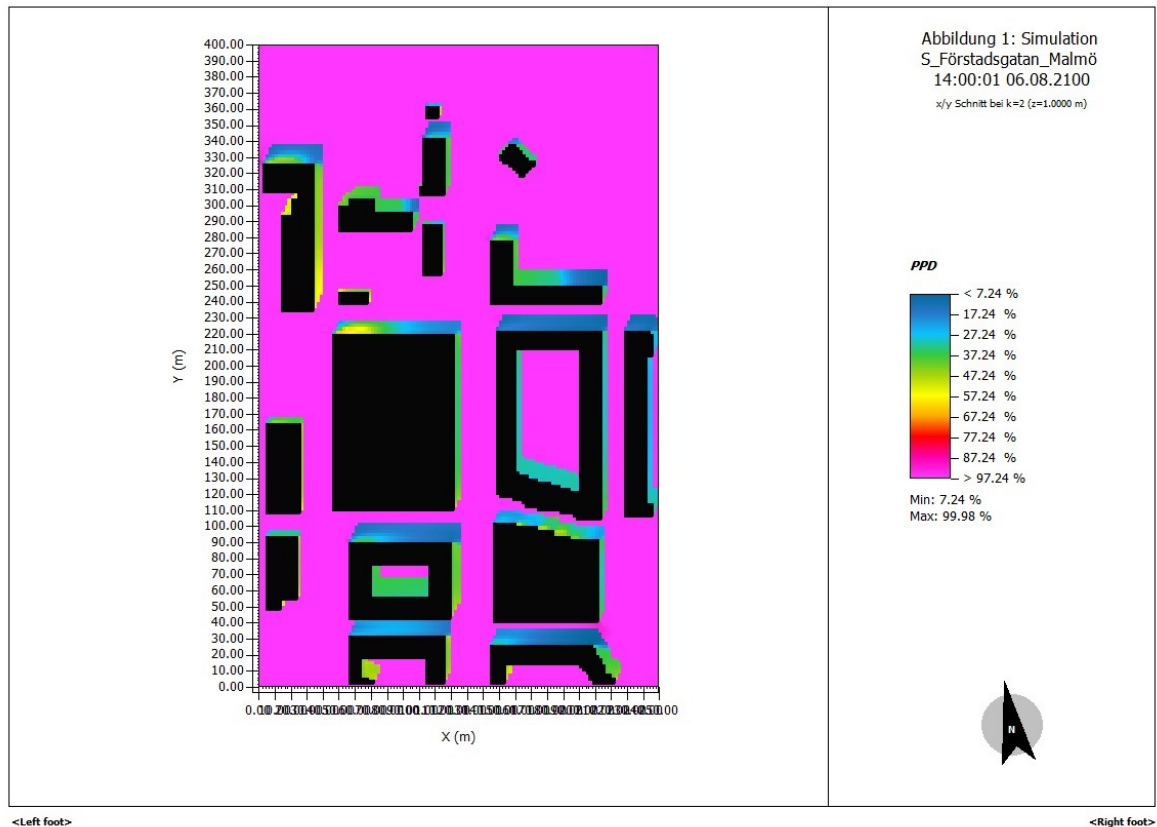
PREDICTED PERCENTAGE OF DISSATISFIED (PPD) ÖKAD MEDELTEMPERATUR 14:00

A) Med träd B) Utan träd

A)



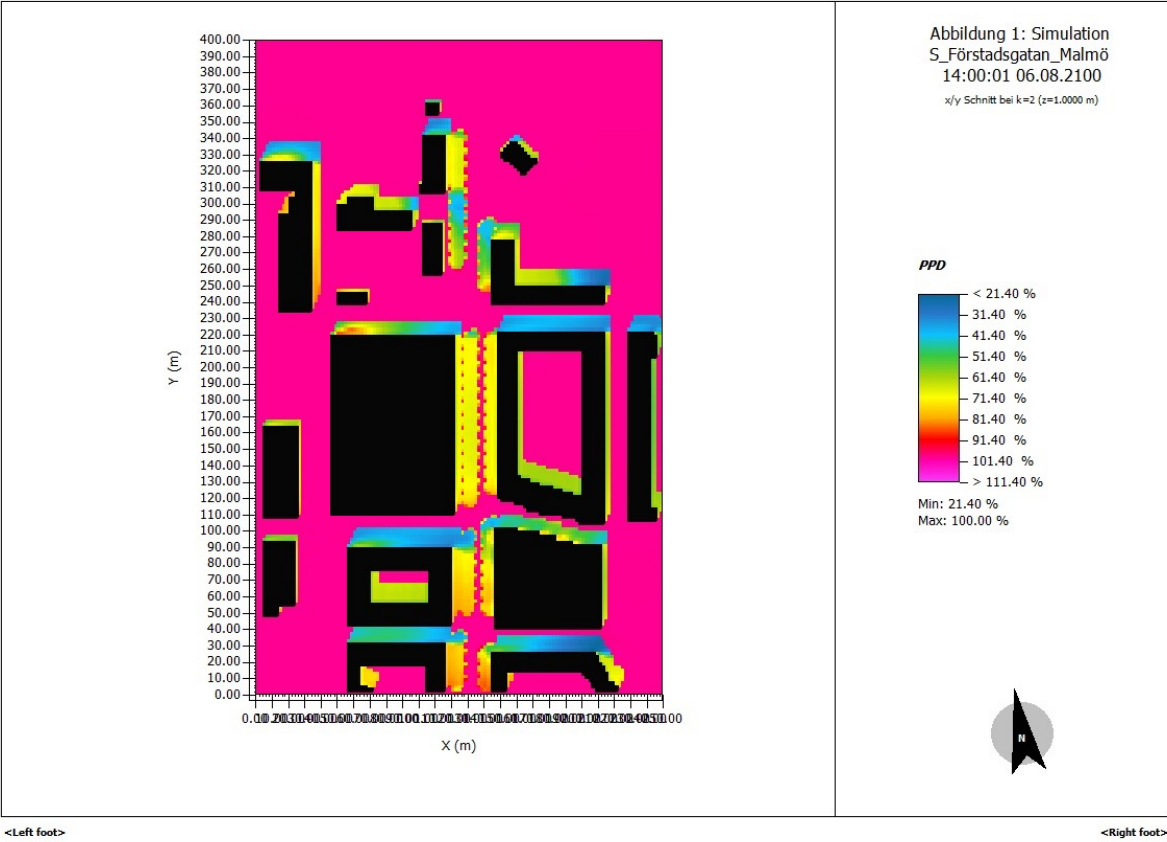
B)



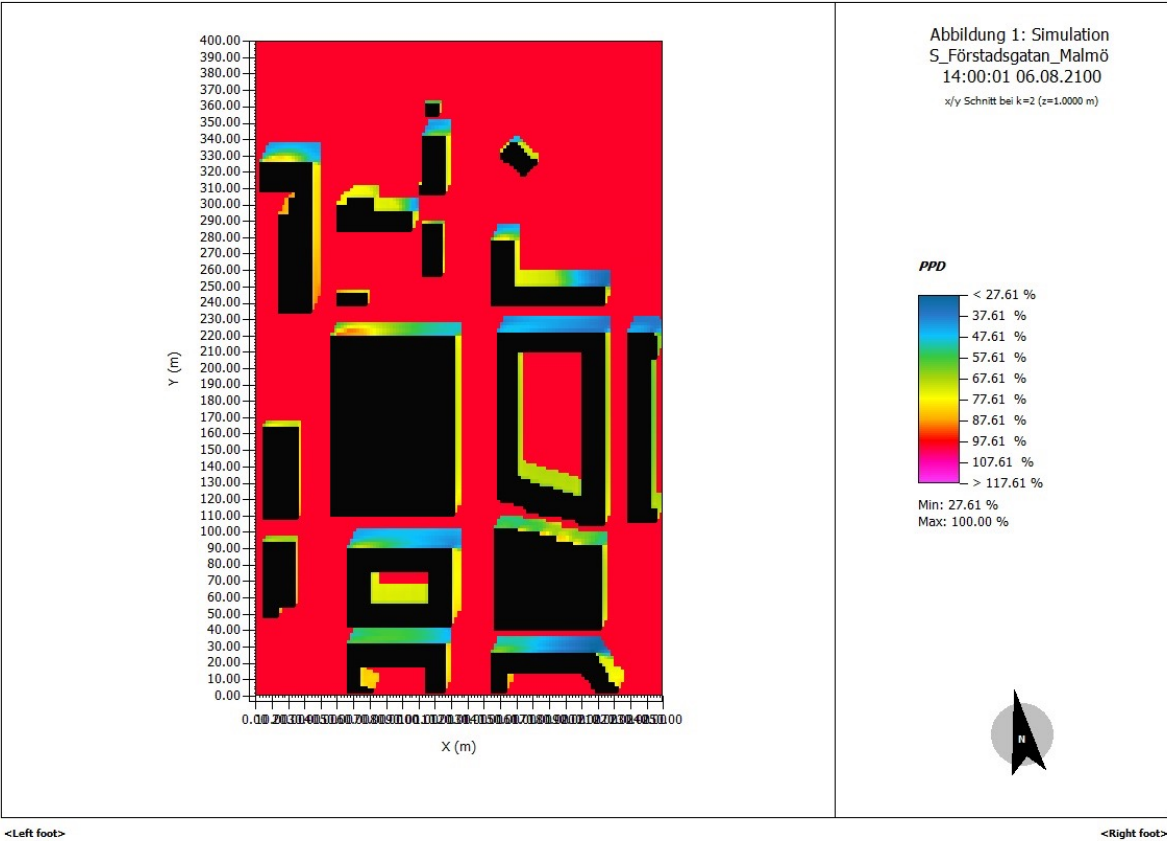
PREDICTED PERCENTAGE OF DISSATISFIED (PPD) VÄRMEBÖLJA 14:00

A) Med träd B) Utan träd

A)



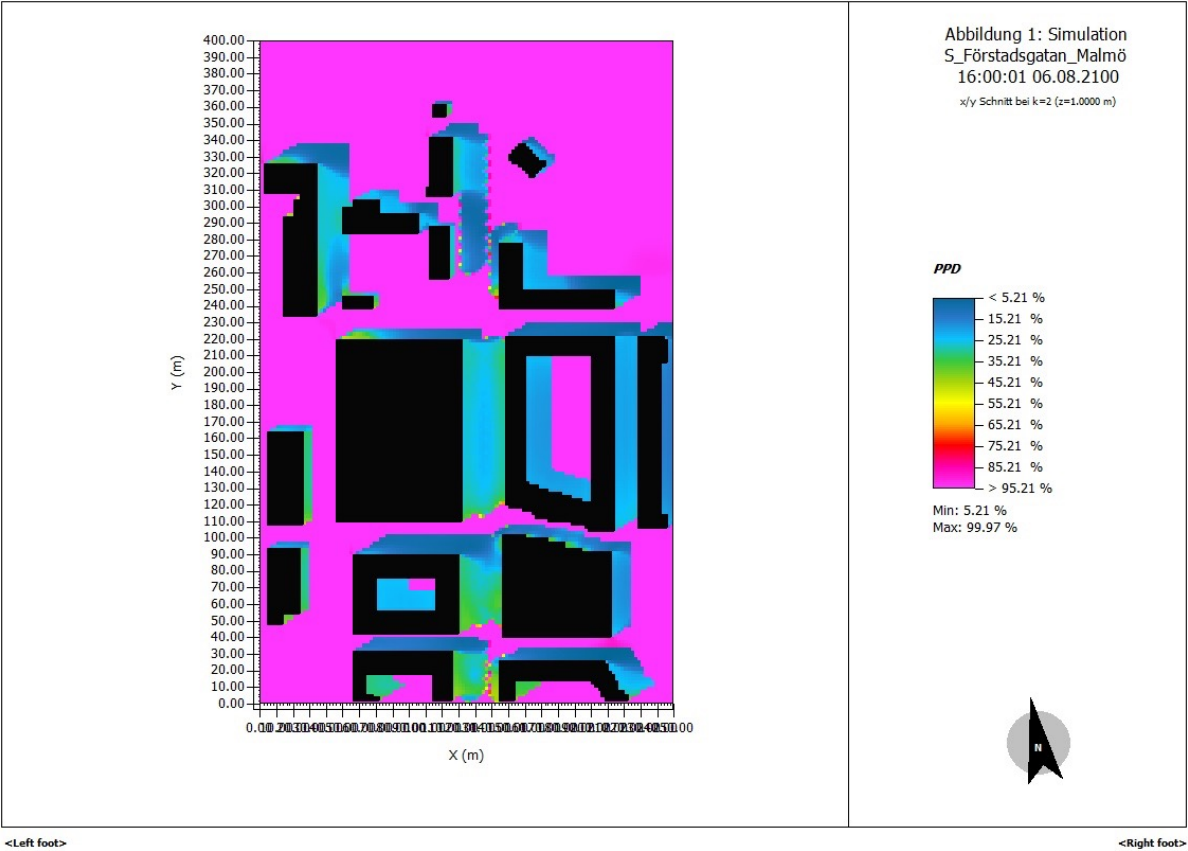
B)



PREDICTED PERCENTAGE OF DISSATISFIED (PPD) ÖKAD MEDELTEMPERATUR 16:00

A) Med träd B) Utan träd

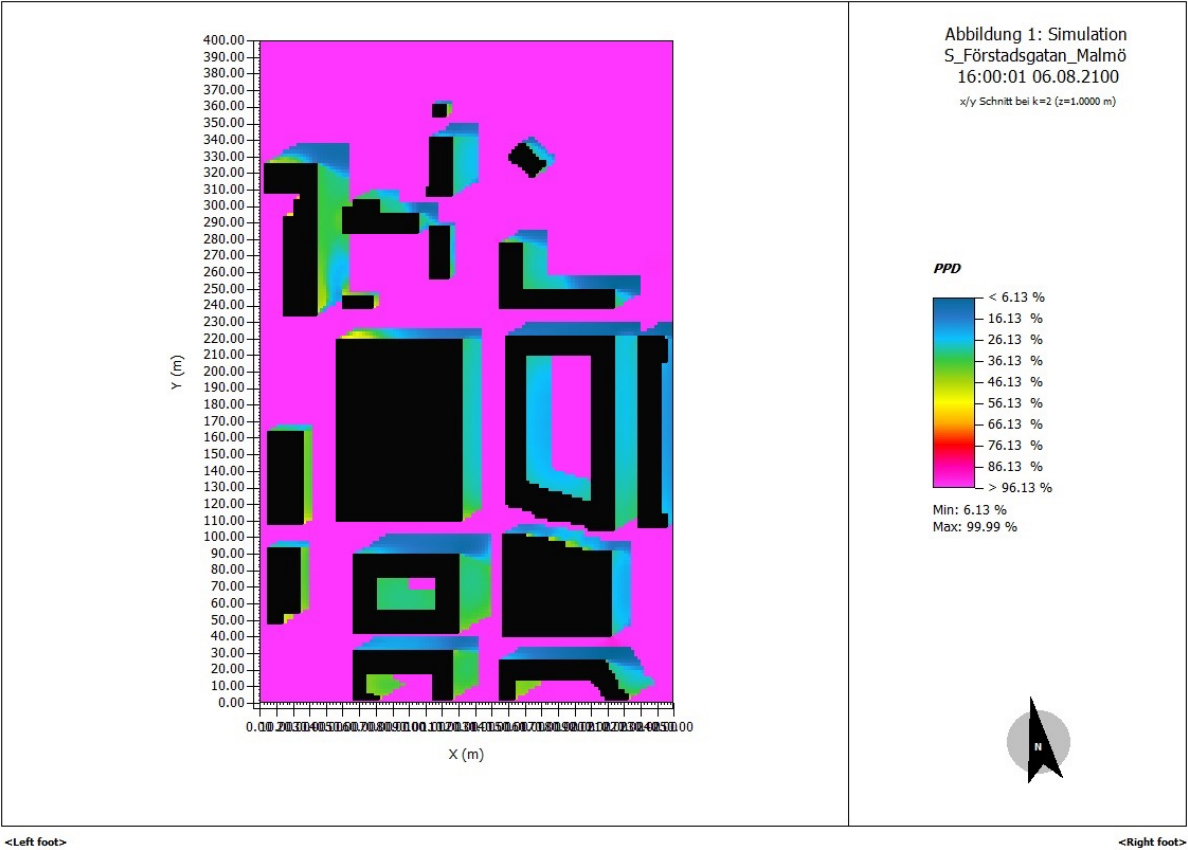
A)



<Left foot>

<Right foot>

B)



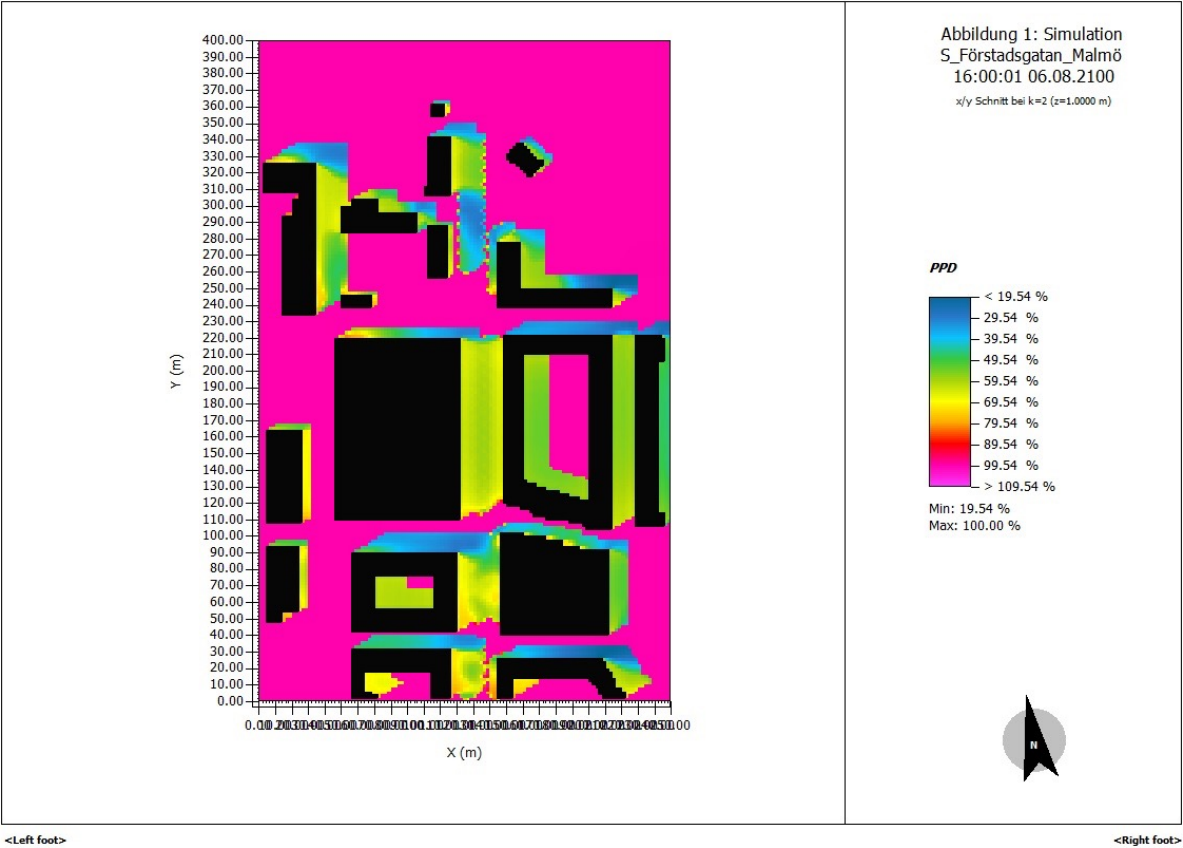
<Left foot>

<Right foot>

PREDICTED PERCENTAGE OF DISSATISFIED (PPD) VÄRMEBÖLJA 16:00

A) Med träd B) Utan träd

A)



B)

